О. В. ПОЛЯНИН
Е. В. УШАКОВ







«ЭНЕРГИЯ»

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 692

О. В. ПОЛЯНИН и Е. В. УШАКОВ

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1969

6П2.15
П 54
УДК 621.382.8

Полянин О. В. и Ушаков Е. В.

П 54 Оптико-электронные устройства, М., «Энергия», 1969.

72 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 692)

Книга знакомит читателя с достижениями в области оптико-электронной техники. В ней рассмотрены принципы работы и характеристики оптико-электронных устройств. Основное внимание уделено вопросам применения оптико-электронных схем в вычислительной технике и в устройствах автоматики.

Рассчитана книга на подготовленных радиолюбителей, знакомых с основами работы электронных вычислительных машин. Она может оказаться полезной также инженерно-техническим работникам, специализирующимся в области вычислительной техники и автоматики.

3-4-5
348-68 **6П2.15**

Полянин Олег Вячеславович и Ушаков Евгений Владимирович

Оптико-электронные устройства

Редактор *И. А. Никольский*

Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Технический редактор *Т. И. Павлова* Корректор *Г. Г. Желтова*

Сдано в набор 31/V 1968 г. Подписано к печати 22/I 1969 г. Т-02524
Формат $84 \times 108^1/_{32}$ Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 3,78 Уч.-изд. л. 5,24
Тираж 40 000 экз. Цена 21 коп. Зак. 1290

Издательство „Энергия“. Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы на стыке квантовой механики, физической оптики и электроники возникло и интенсивно развивается новое направление в радиоэлектронике — оптико-электроника (оптоэлектроника), использующая электронно-фотонные способы получения, передачи и хранения информации. В основе работы оптико-электронных схем и устройств лежат процессы преобразования электрических сигналов в световые и световых в электрические. Функции, осуществляемые электронными потоками (током, электронным пучком) в обычных радиотехнических схемах и электронных приборах, в оптико-электронике выполняются световым потоком.

Возможности и свойства обычных электронных приборов и радиоэлектронных устройств, основанных на использовании электронных потоков и колебательных цепей, в ряде случаев уже не отвечают требованиям современной техники по увеличению быстродействия, надежности, уменьшению габаритов и потреблению энергии. Использование же наряду с электрическими оптических связей разрешает многие затруднения при построении радиоэлектронных устройств. Оптическая связь вместо связи через электрические и электронные контакты обеспечивает полную электрическую развязку между элементами, узлами и блоками радиоэлектронного устройства. При такой однонаправленной передаче сигналов полностью исключается обратный поток информации. Устройства с оптической связью способны работать в широком диапазоне частот (от нуля герц до гигагерц). Эти устройства вследствие разделения информационных сигналов и сигналов срабатывания по невзаимодействующим оптическому и электрическому каналам обладают низким уровнем шумов. Использование оптической связи в радиоэлектронных устройствах открывает, кроме того, возможность дальнейшей миниатюризации и повышения их надежности.

Начало работ в области оптико-электроники относится к 1960—1961 гг. В конце 1961 г. в США было продемонстрировано излучение и передача светового сигнала от источника из арсенида галлия к электрически изолированному от него кремниевому фотодиоду, а в 1964 г. уже демонстрировалось шесть приборов с оптической связью: твердотельный переключатель, многоканальный переключатель (мультиплексер), входной усилитель, элемент смещения, прерыватель и дифференциальное устройство к одностороннему преобразователю. Развитию работ по созданию оптико-электронных приборов и схем в значительной мере способствовало появление новых источников некогерентного и когерентного излучения света (полупроводниковых

и твердотельных оптических квантовых генераторов), малогабаритных приемников излучений и эффективных световодов.

Наиболее перспективным считают применение средств оптикоэлектроники в сложных радиотехнических системах для повышения их эффективности, упрощения управления и обработки информации. Большое внимание уделяется разработке устройств отображения, систем памяти и логики быстродействующих вычислительных машин, причем исследования ведутся как по созданию полностью оптических вычислительных машин, так и по построению оптико-электронных устройств и схем. Создание полностью оптической системы обработки информации следует считать особенно привлекательным с точки зрения достижения максимального быстродействия. Актуальным считается также использование оптической связи для обработки информации в устройствах ввода и вывода цифровых вычислительных машин, в индикаторных сканирующих устройствах, в системах памяти, а также в устройствах автоматики, промышленной электроники и др.

Основными элементами оптико-электронных устройств и схем являются электрически управляемые светоизлучатели (некогерентные светоизлучающие диоды, оптические квантовые генераторы и др.), канализаторы света (световоды) и фотоприемники (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и др.). Рассмотрению устройства, принципов действия, параметров и характеристик таких элементов оптико-электронного тракта, а также вопросов построения и работы оптико-электронных устройств и посвящена эта книга.

Глава первая

КОМПОНЕНТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Использование в научном эксперименте и в различных устройствах таких оптико-электронных и оптических компонентов, как ламп накаливания, ртутных дуговых ламп, фотоэлементов, фоторезисторов, фотоэлектронных умножителей, электронно-оптических преобразователей, полупроводниковых фотодиодов и фототранзисторов, двоякопреломляющих кристаллов, люминофоров, фоточувствительных материалов, а также всевозможных оптических стекол, линз, призм и т. п. читателям, как мы полагаем, хорошо известно.

В устройства автоматики и вычислительной техники указанные компоненты в той или иной мере стали внедряться в основном начиная примерно с 50-х годов. Это относится прежде всего к различного рода устройствам световой индикации и фотоввода информации в вычислительную машину, элементам памяти, регистрам и бистабильным элементам, а также устройствам распознавания (например, акустическим фильтрам на стекловолокне).

С открытия эффекта стимулированной генерации и усиления в оптическом диапазоне электромагнитных волн или, как принято сейчас называть, лазерного эффекта в газах, твердом теле, жидкостях и особенно в полупроводниках началось как бурное внедрение этого эффекта в технику и технологию, так и дальнейшее развитие уже известных и создание новых компонентов оптических и оптико-электронных схем, компонентов оптико-электроники.

К таким компонентам следует отнести: **источники света** — газовые и твердотельные лазеры и, что особенно перспективно для автоматики и вычислительной техники, миниатюрные полупроводниковые квантовые генераторы — высокоэффективные преобразователи электрического тока в видимый и инфракрасный свет; **приемники лучистой энергии**, в особенности полупроводниковые фотодиоды и фототриоды — также малогабаритные эффективные преобразователи световой энергии в электрические сигналы; **пассивные и активные волоконные световоды** — устройства для передачи и усиления света; **устройства внешней модуляции** световой энергии, использующие электрооптические эффекты Поккельса и Керра, магнитооптический эффект Фарадея, механические, электромеханические и электроакустические способы отклонения световых пучков. К компонентам оптико-электроники следует отнести обычные (на основе щелочно-галлоидных эмульсий) фоточувствительные материалы, а также фотохромные материалы — соединения, обратимо изменяющие свой цвет (спектр поглощения) под действием света определенных длин волн.

1. ИСТОЧНИКИ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

Сравнительные характеристики оптических квантовых генераторов. Рассмотрим сравнительные характеристики оптических квантовых генераторов вообще и подробно разберем основные принципы работы и типичные характеристики полупроводниковых лазерных и люминесцентных диодов.

Лазеры, созданные к настоящему времени, условно можно разделить на три вида: твердотельные, газовые и полупроводниковые.

Активными материалами твердотельных лазеров могут быть рубин с присадкой хрома, стекло с примесью неодимия, вольфрамат кальция с примесью неодимия, иттрий-алюминиевый гранат с примесью неодимия, фтористый кальций с примесью диспрозия и др. Последние три материала находят применение в основном в лазерах непрерывного излучения. Оптическая накачка твердотельных лазеров осуществляется от ртутных, разрядных дуговых и других ламп; в лазерах, работающих в непрерывном режиме, может использоваться солнечная накачка при применении для этой цели параболических фокусирующих устройств. Известны твердотельные лазерные устройства с накачкой от лазерных полупроводниковых диодов, а также с химической накачкой, отличающиеся сравнительно меньшими габаритами из-за отсутствия громоздких источников электропитания.

Рубиновые лазеры дают излучение на длине волны порядка 0,69 *мк*, стекла с примесью неодимия — на длине волны 1,06 *мк*, фтористый кальций с примесью диспрозия дает излучение на длине волны порядка 2,36 *мк*.

Твердотельные лазеры, работающие в импульсном режиме, характеризуются, как правило, низкой частотой следования импульсов (от долей герца до десятков герц). Выходная энергия таких лазеров лежит в области от единиц до сотен и тысяч джоулей. Средняя мощность излучения лазеров, работающих в непрерывном режиме, составляет величины от десятков милливатт до 1 *вт*. Следует, однако, отметить, что за рубежом уже созданы отдельные твердотельные лазеры со средней мощностью в непрерывном режиме работы порядка 40 *вт*; к. п. д. твердотельных лазеров, как правило, не превышает 1 %.

В силу перечисленных свойств твердотельные лазеры не нашли в настоящее время широкого применения в оптико-электронных элементах автоматики и вычислительной технике. Однако они уже с успехом используются в промышленности, технологии и медицине.

Газовые лазеры отличаются исключительно высокой когерентностью излучения, стабильностью работы, простотой получения непрерывного режима излучения, возможностью перекрытия широкого участка спектра. В коротковолновом участке спектра возможно получить излучение на длине волны порядка 0,3 *мк*, длинноволновая область простирается вплоть до субмиллиметровых волн. Мощность газовых лазеров составляет, как правило, 1 *вт* или доли ватта; к. п. д. их, однако, весьма низок (не больше 1%).

Простота и стабильность газовых лазеров в работе, а также возможность получения излучения не только в видимой, но и в ультрафиолетовой области привлекают внимание специалистов автоматики и вычислительной техники при построении устройств индикации и отображения, запоминающих устройств, устройств трехмерного изображения (голографии) и т. п.

Полупроводниковые люминесцентные и лазерные излучатели в отличие от твердотельных и газовых лазеров обладают исключительной компактностью, весьма малой инерционностью и очень высоким к. п. д., который для инжекционных лазеров в пределе может быть близок к 100%. Благодаря таким свойствам полупроводниковые лазерные и люминесцентные диоды особенно подходят для использования в оптических вычислительных машинах, в оптико-электронных устройствах автоматики и вычислительной техники.

Принципы работы полупроводниковых источников света. Рассмотрим подробней принципы работы и основные параметры и характеристики полупроводниковых источников света, включая наиболее подходящие из них для использования при построении логических, запоминающих и прочих оптических и оптико-электронных схем и устройств.

Получение когерентного монохроматического или спонтанного высвечивания (люминесценции) в полупроводниках, как известно, может быть достигнуто следующими основными методами возбуждения (накачки): оптическим возбуждением; воздействием на полупроводник пучком быстрых электронов с достаточно высокой энергией; возбуждением полупроводниковых материалов импульсами электрического поля или, иначе, ударной ионизацией. При определенных условиях, например при подаче на *p-n* переход импульсов напряжения обратной полярности, по достижении лавинного пробоя может наблюдаться спонтанное высвечивание, а при создании определенной обратной связи и лазерное высвечивание.

Оптическое возбуждение от обычных источников света нецелесообразно из-за очень малого к. п. д. такого возбуждения. Более подходящим является использование излучения того или иного лазера. При этом значительно большая эффективность получается как за счет того, что излучение лазера когерентно, монохроматично, может быть хорошо сфокусировано и дает очень высокую плотность возбуждения, так и за счет правильного подбора частоты излучения возбуждающего лазера и ширины запрещенной зоны полупроводника.

При возбуждении с помощью пучка быстрых электронов могут быть созданы источники, работающие как в ультрафиолетовой части спектра, так и в далекой инфракрасной области. Однако для построения таких генераторов света требуется создание ускорителей электронов на большие токи; работа возможна, как правило, лишь в импульсном режиме, а коэффициент преобразования не может превышать 40%.

При возбуждении ударной ионизацией возникают лишние носители зарядов. Через небольшой промежуток времени носители рекомбинируют и отдают свою избыточную энергию в виде светового некогерентного или когерентного излучения. Один из подобных первых источников света на арсениде галлия изготовлялся так, что между двумя областями типа *p* образовывался слой толщиной в 1 *мк* с большим удельным сопротивлением. При приложении к прибору напряжения 12 *в* указанный слой пробивается, а образовавшиеся в результате ударной ионизации носители зарядов рекомбинируют. При этом наблюдается высвечивание образца в инфракрасной области спектра. Такой метод возбуждения, по-видимому, позволит использовать целый ряд полупроводниковых материалов без создания *p-n* перехода, что к тому же позволит получить излучение в видимом спектре.

Наибольшее распространение получил метод возбуждения при инжекции носителей через *p-n* переход. Рассмотрим это подробней.

Инжекционное возбуждение самым простым образом можно объяснить на основе рассмотрения перехода типа *p-i-n*, энергетическая схема которого представлена на рис. 1.

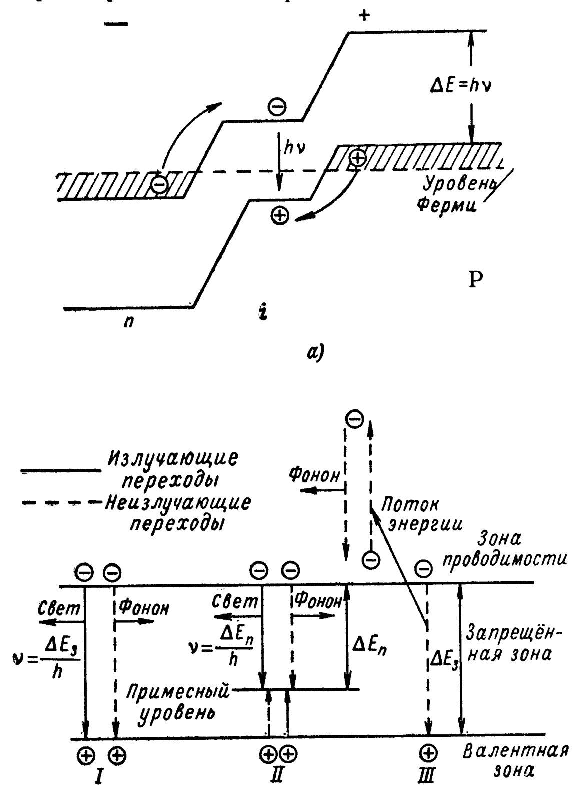


Рис. 1. Энергетическая схема перехода типа *p-i-n*.

а — расположение энергетических зон и уровня Ферми диода структуры *p-i-n*; *б* — механизм рекомбинации в модели зон полупроводника (*I* — переходы типа зона—зона, *II* — переходы типа зона — примесный уровень, *III* — переход с возбуждением электрона в зоне проводимости).

В идеальном полупроводнике при температуре абсолютного нуля валентная зона полностью занята электронами, а зона проводимости полностью свободна, и полупроводник является изолятором. Однако при температуре выше нуля вследствие теплового возбуждения часть валентных электронов переходит в зону проводимости; в валентной зоне при этом возникают свободные места — дырки.

Термодинамическое равновесие характеризуется тем, что имеются равновесные концентрации основных носителей — дырок и электронов ссответственно в областях *p* и *n*, которые способны рекомбинировать с носителями противоположного знака в случае инжекции последних извне. В случае с переходом типа *p-i-n* при приложении к нему напряжения в прямом направлении в зоне *i* появляются носители обоих знаков. Для рекомбинации этих носителей имеется несколько возможностей. При этом энергия от внешнего источника напряжения передается решетке полупроводника в виде тепловой или световой энергии. Потенциальный барьер между областями *p* и *n* снижается, и электроны из области *n* диффундируют в область объемного заряда (зона *i* на рис. 1,*а*) и в область *p*, создавая там избыточную (неравновесную) концентрацию. Аналогичным же образом возникает избыточная концентрация дырок в области *n* и слое объемного заряда. На рис. 1,*б* на примере зонно-примесной структуры полупроводника показаны основные явления при рекомбинации. Если электрон или дырка переходит из одной зоны в другую, то такая рекомбинация носит название межзонной или собственной (*I* на рис. 1,*б*). Во втором случае (*II* на рис. 1,*б*) переход осуществляется через примесный уровень. Такая рекомбинация называется примесной. Возможен и третий случай рекомбинации (*III* на рис. 1,*б*).

В результате межзонной или примесной рекомбинации при исчезновении пары (электрона и дырки) происходит выделение энергии, определяемой в первом случае шириной запрещенной зоны $\Delta E_з$, а во втором — шириной $\Delta E_п$ от зоны проводимости до примесного уровня. Энергия может выделяться в виде светового кванта ($\nu = \Delta E/h$) или передаваться в виде тепла (фонона) кристаллической решетке. В третьем случае энергия рекомбинирующей пары передается третьему свободному носителю тока, который в дальнейшем передает полученную энергию в виде фонона.

Переходы с выделением световых квантов называют излучательными, а в случае выделения фононов — безызлучательными. Кроме того, различают прямые и непрямые излучательные переходы. В случае прямых переходов при рекомбинации электрона и дырки излучается только фотон, в случае же непрямого перехода в процессе рекомбинации, кроме появления фотона, происходит испускание (или поглощение) фонона — кванта колебаний решетки кристалла.

Вероятность межзонной излучательной рекомбинации при прямых переходах на несколько порядков выше вероятности при непрямых переходах. Вероятность излучательной рекомбинации возрастает также с увеличением ширины запрещенной зоны. Следует также отметить, что электроны и дырки в кристалле имеют массу, отличную от массы свободного электрона и называемую эффективной массой. Излучательная рекомбинация более вероятна в материалах с малой эффективной массой. Наилучшим сочетанием свойств, необходимых для излучательной рекомбинации, а следовательно, для создания эффективных инжекционных источников света, обладает арсенид галлия, чем, в частности, и объясняется тот факт, что первый лазерный диод был изготовлен именно из этого материала.

В зависимости от числа инжектированных носителей по отношению к состоянию термодинамического равновесия в зоне проводимости происходит увеличение, а в валентной зоне уменьшение уровня населенности допустимых состояний. При малом уровне инжекции это отклонение может привести к спонтанным переходам, т. е.

к люминесценции, а при большей инжекции, т. е. после достижения инверсии населенности или, как иногда говорят, отрицательной температуры, — к лазерному эффекту (интенсивному, когерентному, монохроматическому высвечиванию с малым углом расходимости светового луча).

Для получения лазерного эффекта в отличие от люминесценции к полупроводниковому устройству предъявляются следующие требования: 1) выравнивание заряда инжектированных носителей должно протекать в основном по излучательным оптическим переходам; 2) инжекция носителей должна быть достаточно большой, чтобы индуцированная эмиссия превосходила индуцированную абсорбцию и были перекрыты неизбежные потери; 3) активная зона устройства должна находиться в объеме, резонансная частота которого соответствует спектральному интервалу, в котором возможно индуцированное излучение. Другими словами, для определенного направления распространения света должна быть создана сильная обратная связь.

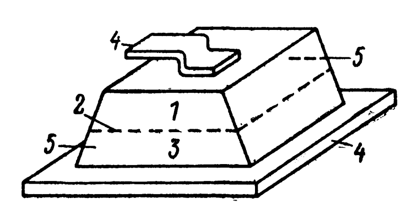


Рис. 2. Схематическое устройство полупроводникового инжекционного лазера.

1 — полупроводник *p*-типа; *2* — *p-n* переход; *3* — полупроводник *n*-типа; *4* — контакты; *5* — плоскопараллельные полированные грани.

Два первых условия в основном обусловливаются свойствами материалов и определяют выбор полупроводников для изготовления диодов, а также величину тока накачки. Третье условие обеспечивается соответствующим конструктивно-геометрическим решением. Конструктивно прибор выполняется так, что при появлении излучения оно претерпевает многократное отражение от граней оптического резонатора, проходя через рабочий объем полупроводника, находящегося в состоянии инверсной населенности. Оптическое усиление на единицу длины в полупроводниках может быть в сотни и тысячи раз больше, чем в иных типах лазерных устройств. Поэтому даже очень короткая, составляющая в длину доли миллиметра оптическая дорожка, несмотря на низкий коэффициент отражения плоскопараллельных полированных граней (для арсенида галлия он составляет примерно 35%), оказывается достаточной для перехода к режиму генерации когерентного монохроматического света. Схематическое устройство полупроводникового лазера показано на рис. 2.

Основные характеристики инжекционных излучательных диодов. Основными характеристиками полупроводниковых инжекционных источников света являются: спектральные характеристики, диаграмма направленности излучения, к. п. д. (эффективность преобразования электрической энергии в световую), временные (динамические) характеристики, мощность, а также хорошо известные и для обычных диодов вольт-амперные и вольт-емкостные характеристики. Для лазерных диодов, кроме того, важным параметром является пороговая плотность тока.

Указанные параметры в значительной мере зависят от температуры рабочего кристалла диода. Некоторые лазерные диоды не

могут, например, вообще работать при комнатной температуре, другие при комнатной температуре могут работать лишь в импульсном режиме при определенной минимально допустимой скважности. От температуры кристалла зависит величина пороговой плотности тока, длина волны излучения и т. п. Иными словами, важной характеристикой источника света является температурный режим его работы.

Спектральная характеристика излучательного диода, как и для любых источников света, представляет собой зависимость интенсив-

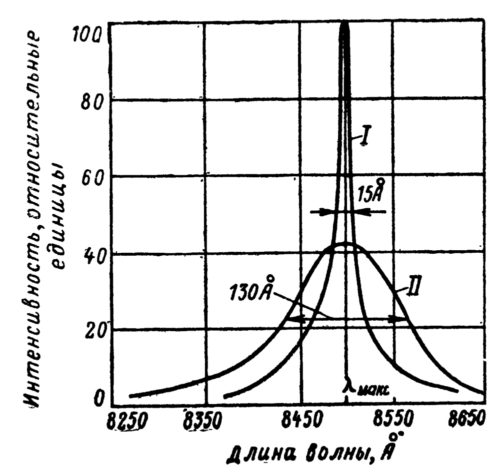
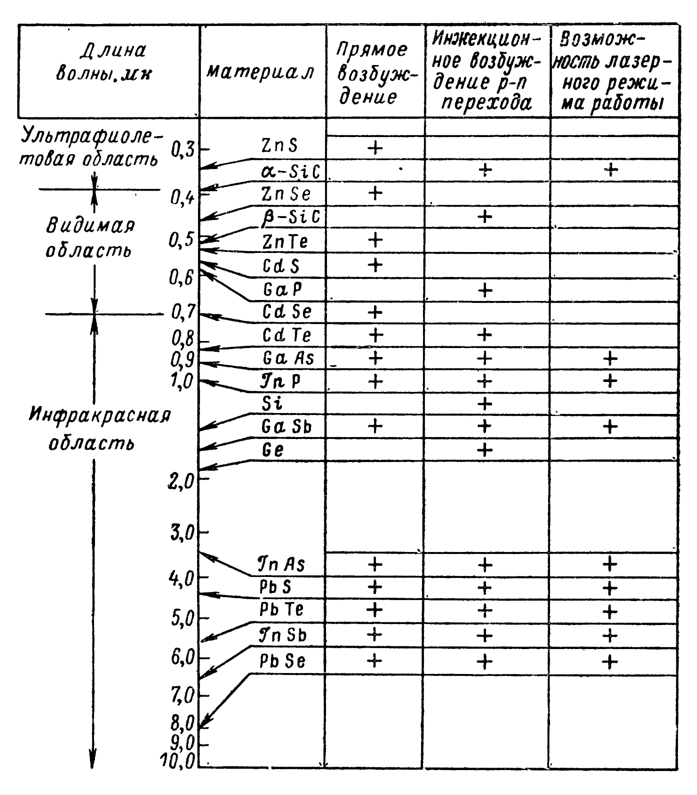


Рис. 3. Спектральные характеристики лазерного диода из арсенида галлия.
I — при токе накачки 10 *а*; *II* — при токе накачки 2,5 *а*.

ности излучения (чаще в относительных единицах) от длины волны λ, выражаемой в нанометрах (1 *нм* $=10^{-9}$ *м*) или ангстремах (1Å $=10^{-8}$ *м*), а также в микронах. Как правило, тот или иной источник характеризуется шириной спектральной линии на уровне 0,5 от максимальной интенсивности. Типичные спектральные характеристики полупроводниковых инжекционных источников из арсенида галлия представлены на рис. 3.

Лазерные диоды имеют относительно узкую ширину спектральной линии излучения, доходящую до десятых и сотых долей ангстрема. Люминесцентные диоды дают более широкую (до нескольких сотен ангстрем) спектральную линию излучения. Связано это, в частности, с тем, что оптический резонатор полупроводникового лазера имеет длину, кратную основной длине волны излучения. Поэтому для генерации именно этой длины волны создаются наилучшие условия. В люминесцентном диоде, как правило, резонатор отсутствует. Длина волны излучения определяется энергетической шириной зон полупроводника. Как правило, длина волны излучения λ однозначно определяется шириной запрещенной зоны $\Delta E_з$ полупроводника, а именно $\lambda = hc/\Delta E_з$, где c — скорость света, а h — постоянная Планка.

Большинство из известных в настоящее время полупроводниковых материалов позволяет создавать источники света, дающие излучение в видимой и инфракрасной областях спектра. Люминесцентные диоды на карбиде кремния (SiC) дают излучение, спектральный максимум которого лежит примерно в области 450 и 560 *нм*, голубое и темно-зеленое свечение. Диоды на основе фосфид-арсенид галлия ($Ga\,As_x\,P_{1-x}$) в зависимости от процентного соотношения ар-



Материал	Прямое возбуждение	Инжекционное возбуждение p-n перехода	Возможность лазерного режима работы
ZnS	+		
α-SiC		+	+
ZnSe	+		
β-SiC		+	
ZnTe	+		
CdS	+		
GaP		+	
CdSe	+		
CdTe	+	+	
GaAs	+	+	+
InP	+	+	+
Si		+	
GaSb	+	+	+
Ge		+	
InAs	+	+	+
PbS	+	+	+
PbTe	+	+	+
InSb	+	+	+
PbSe	+	+	+

Рис. 4. Основные электролюминесцентные полупроводниковые материалы и шкала волн, в которой они излучают (знаком «+» отмечены способы возбуждения и возможность работы в лазерном режиме).

сенида галлия и фосфора позволяют перекрыть область спектра от 650 до 840 *нм*. Полупроводниковые диоды на основе системы GaAs—InAs позволяют перекрыть область спектра от 840 до 3 100 *нм*. В США и во Франции от лазеров на In As получено излучение также на длине волны 3 900 *нм*. На рис. 4 перечислены все основные полупроводниковые материалы, на которых можно получить тем или иным способом высвечивание практически от ближней ультрафиолетовой области до более далекой инфракрасной области,

причем в правой части рисунка знаком «+» указана возможность того или иного возбуждения и возможность работы в лазерном режиме.

Таким образом, полупроводниковые источники света позволяют перекрывать достаточно широкий участок оптического спектра, что, безусловно, имеет большое практическое значение при построении оптико-электронных схем.

Диаграмма направленности излучения источника характеризует пространственное распределение интенсивности излучения. Излучение лазерных диодов имеет достаточно малый (как правило, не превышающий 10°) угол расходимости светового пучка. Необходимо отметить, что из всех типов лазеров полупроводниковые имеют наибольшие углы расходимости. Большая расходимость луча полупроводникового лазера, в частности, в значительной мере связана с малыми геометрическими размерами кристалла, равными обычно миллиметру или долям миллиметра. На рис. 5 показано угловое распределение интенсивности светового пучка лазера, рабочий кристалл которого выполнен в виде прямоугольного параллелепипеда размерами примерно 0,13 и 1,3 *мм* вдоль направления осей *y* и *z* соответственно. Как видно из этого рисунка, излучение вдоль оси *z*, т. е. вдоль более длинного направления параллелепипеда, получается с меньшей расходимостью (порядка 2,5° на уровне 0,5), нежели вдоль направления *y*. Следует подчеркнуть также, что и пороговый ток генерации для направления *z* оказывается значительно меньшим, чем для направления *y* (8,13 и 18,03 *а* соответственно).

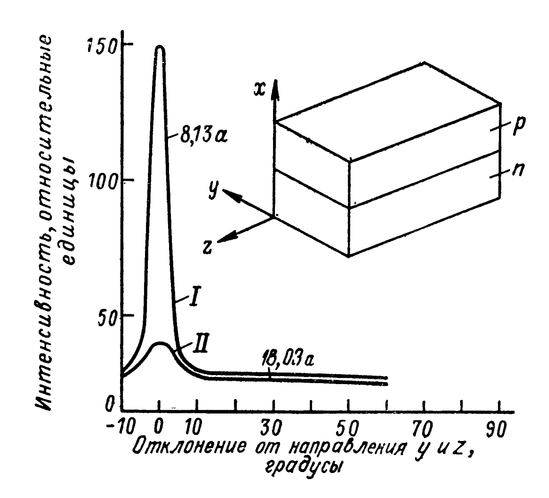


Рис. 5. Кривые, характеризующие направленность излучения лазера.

I — кривая направленности излучения относительно направления оси *z* (пороговый ток составляет 8,13 *а*); *II* — кривая направленности излучения относительно направления оси *y* (пороговый ток составляет 18,03 *а*).

Рассмотренный пример подтверждает существенную зависимость величины порогового тока генерации и диаграммы направленности излучения лазера от его конструктивного исполнения.

Диаграмма направленности люминесцентного полупроводникового диода также в основном определяется его конструкцией. Значительную концентрацию излучения вдоль какого-либо направления для таких диодов удается получить лишь благодаря использованию дополнительных внешних фокусирующих отражателей или отражающих покрытий, нанесенных непосредственно на кристалл полупроводника. В последнем случае самому кристаллу полупроводника придается определенная форма. В качестве примера на рис. 6 показано схематическое устройство отражательного диода, одна из сторон которого выполнена в виде выпуклого параболоида с отражающим покрытием.

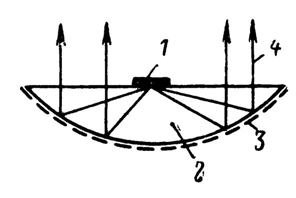


Рис. 6. Схематическое устройство отражательного диода.

1 — *p*-область; *2* — *n*-область; *3* — параболическая поверхность диода с отражающим покрытием; *4* — траектория одного из лучей.

Диаграмму направленности излучения источника необходимо учитывать при построении оптических и оптико-электронных схем. Плохая или недостаточно хорошая направленность излучения источника накладывает определенные ограничения на минимальные размеры приемников лучистой энергии, компоновку источника с передающей линией и приемником света и т. п.

Эффективность η (к. п. д.) преобразования электрической энергии в световую часто называют еще внутренним квантовым выходом. Последний представляет собой отношение числа фотонов (квантов света) к числу носителей, появившихся в *p-n* переходе. Если в результате рекомбинации с дыркой каждого электрона, появившегося в области *p-n* перехода, выделится фотон, то в этом случае эффективность преобразования η будет равна единице, то есть к. п. д. составит 100%. Как уже отмечалось, полупроводниковые квантовые генераторы в отличие от прочих типов квантовых генераторов обладают значительно большей эффективностью преобразования энергии накачки, в пределе приближающейся к единице (100%).

Практически, однако, эффективность преобразования оказывается значительно ниже. Связано это с тем, что, во-первых, не весь свет, появившийся в *p-n* области, выходит из рабочего кристалла диода, а во-вторых, не весь световой поток, вышедший из кристалла, регистрируется приемником. Отношение количества квантов света, вышедших из диода, к количеству рекомбинировавших при этом электронов называют внешним квантовым выходом $\eta_{\text{вн.вых}}$.

Выражение для внешнего квантового выхода имеет следующий вид:

$$\eta_{\text{вн.вых}} = \frac{qN_{\text{вн}}}{I_{\text{д}}},$$

где q — заряд электрона;

$N_{\text{вн}}$ — число внешних фотонов;

$I_{\text{д}}$ — ток через диод.

Из этого выражения видно, что внешний квантовый выход можно характеризовать как отношение выходной мощности излучения к току через *p-n* переход.

Внешний квантовый выход ниже внутреннего квантового выхода из-за того, что часть светового потока, образовавшегося в результате излучательной рекомбинации носителей в области *p-n* перехода, поглощается в толще самого полупроводникового материала диода, обладающего значительным коэффициентом поглощения. Для люминесцентных диодов внешний квантовый выход, как правило, ниже, чем для лазерных. Это связано, в частности, с тем, что на границе двух сред с различными показателями преломления имеет

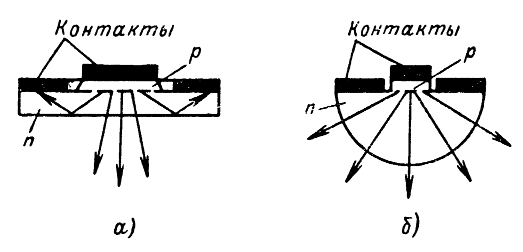


Рис. 7. Схематическое устройство люминесцентных диодов.

а — диод плоской конструкции; *б* — диод полусферической конструкции.

место полное внутреннее отражение той части светового потока, угол падения которой на указанную границу превышает критический угол.

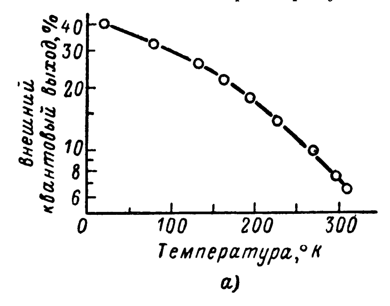
Величина критического угла $\alpha_{крит}$ определяется как $\arcsin n_2/n_1$, где n_2 — показатель преломления внешней среды (в случае воздушной среды n_2 принимают равным единице), а n_1 — показатель преломления полупроводникового материала диода. У диода, изготовленного из арсенида галлия, например, критический угол на границе двух сред (кристалл арсенида галлия — воздух) составляет примерно 17°. Поэтому внешний квантовый выход люминесцентного диода в значительной мере определяется его конфигурацией. На рис. 7 показаны два люминесцентных диода различной конфигурации. Если для плоской конструкции диода (рис. 7,*а*) к. п. д., как правило, составляет доли процента, то для полусферической конструкции диода (рис. 7,*б*) он может составлять единицы и десятки процентов.

На рис. 8. показаны зависимости к. п. д. от температуры кристалла (рис. 8,*а*) и от тока через него (рис. 8,*б*) для диода полусферической конструкции.

Сравнение к. п. д. диодов с плоской и с полусферической геометрией показывает, что к. п. д. второго источника выше в 10—12 раз по сравнению с первым (при комнатной температуре и при токе 100 *ма*). Полусферическая геометрия кристалла диода приводит к тому, что практически все излучение, падающее на поверхность полусферы, образует с нормалью к ней угол, меньший критического, т. е. исключается полное внутреннее отражение. Если бы поглощение в полусферическом кристалле не было большим из-за боль-

шей толщины тела кристалла, то внешний квантовый выход увеличился бы по сравнению с плоской конфигурацией кристалла примерно в 26 раз.

Временнáя динамическая характеристика полупроводникового источника света характеризуется минимальным временем нарастания и спада светового импульса, завалом плоской вершины при питании его прямоугольными импульсами тока, а также минимальной скважностью импульсов.



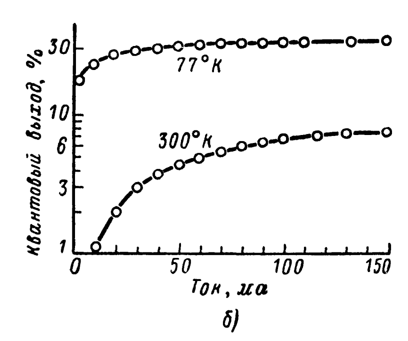


Рис. 8. Зависимость величины внешнего квантового выхода у диода полусферической конструкции от температуры (*а*) и от тока через диод при температурах 77 и 300° К (*б*).

Длительность переднего и заднего фронтов светового импульса в основном зависит от постоянной времени *RC* и индуктивности диода и цепи питания. Завал плоской части импульса, а также его фронты в значительной мере зависят от температуры рабочего кристалла источника. Работа полупроводниковых источников света в непрерывном режиме или при малой скважности (на большой частоте) часто ограничивается именно тем, что кристалл может сильно перегреваться, что ведет к его разрушению или резкому снижению к. п. д.

Фронты импульсов света известных в настоящее время люминесцентных и лазерных диодов, работающих при комнатной температуре, могут быть порядка нескольких и даже одной наносекунды. Частота повторения импульсов люминесцентных диодов может быть равна десяткам мегагерц и выше. Для лазерных диодов пока достигнуты значительно меньшие частоты.

Конструктивное выполнение быстродействующего люминесцентного диода, аналогичное конструкции туннельного и параметрического диодов, обеспечивающее малую индуктивность прибора и удобство его включения в коаксиальный контур, показано на рис. 9. Вольт-емкостная и вольт-амперная характеристики лазерных и люминесцентных диодов аналогичны хорошо известным характеристикам обычных полупроводниковых диодов.

Мощность современных полупроводниковых лазеров, работающих в импульсном режиме как при охлаждении, так и при комнатной температуре, для различных образцов лежит в интервале от нескольких милливатт до нескольких десятков ватт. Люминесцентные диоды, работающие в непрерывном режиме при комнатной тем-

пературе, как правило, имеют выходную мощность порядка одного, а чаще долей милливатта.

Заканчивая рассмотрение полупроводниковых источников света, отметим еще два их свойства, которые могут быть использованы при построении оптико-электронных схем. Первое свойство заключается в том, что как излучение лазерных, так и люминесцентных диодов можно легко промодулировать путем соответствующей модуляции тока накачки. Такой вид модуляции носит название внутренней. Частотный предел при этом может быть более гигагерца.

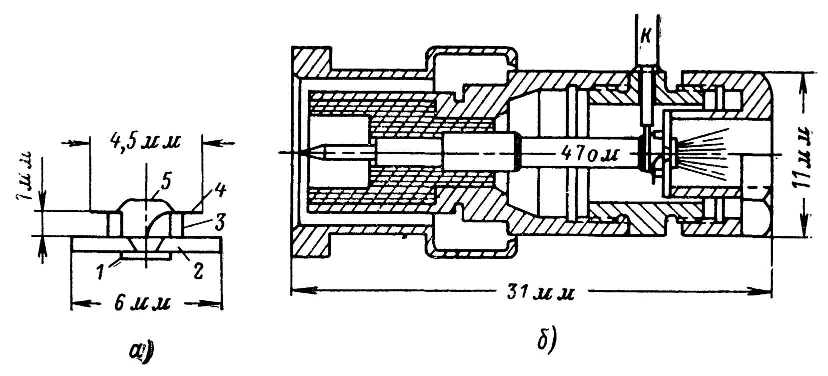


Рис. 9. Быстродействующий люминесцентный диод.

а — конструкция диода (*1* — арсенид галлия; *2* — молибден, покрытый золотом; *3* — керамика; *4* — крышка из ковара, покрытая золотом; *5* — соединение); *б* — крепление диода в штепсельном разъеме (*К* — сверхминиатюрный коаксиальный кабель 50 *ом*).

Указанное свойство может найти самое широкое применение во всевозможного рода устройствах. Другое свойство заключается в возможности использования полупроводниковых диодов для усиления световых потоков. Сообщалось, что в США с помощью лазерного арсенид-галлиевого диода получено усиление светового сигнала примерно в 2 000 раз с мощностью на выходе 150 *мвт*. Заметим также, что в настоящее время известны арсенид-галлиевые диоды, обладающие туннельной характеристикой, что также открывает хорошие перспективы по созданию индикационных, запоминающих и бистабильных логических оптико-электронных схем.

2. ПРИЕМНИКИ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

Все фотоприемники можно подразделить на три основных типа: фотоприемники с внешним фотоэффектом, фотоприемники с внутренним фотоэффектом и лазерные устройства, которые могут использоваться в режиме приемников и усилителей световой энергии.

Внешний фотоэффект характеризуется эмиссией электронов в вакуум из поверхности тела фотокатода под влиянием энергии фотонов, падающих на эту поверхность. Фотоны при этом сообщают электронам вещества фотокатода энергию, достаточную для их вырывания из атомной решетки этого вещества. У поверхности фотокатода возникает электронное облако, состоящее из свободных за-

рядов. В случае приложения внешнего напряжения между анодом и катодом через прибор начинает протекать электрический ток, величина которого зависит от материала катода и параметров светового потока (интенсивности и спектрального состава).

Внутренний фотоэффект сопровождается переходами электронов и дырок внутри полупроводника из связанных состояний в свободные без выхода электронов наружу. При этом различают два проявления внутреннего фотоэффекта. Первое из них состоит в том, что в результате появления свободных носителей заряда изменяется сопротивление полупроводника. Фотоприемники, работающие на этом принципе, называются фоторезисторами (фотосопротивлениями). Второе проявление внутреннего фотоэффекта заключается в возникновении фото-э. д. с. на границе двух контактирующих материалов (металл — полупроводник или два полупроводника). Фотоприемники, основанные на этом явлении, называются вентильными фотоэлементами (они названы так из-за того, что область контакта обладает вентильными свойствами). Если последовательно с вентильным элементом включить нагрузочное сопротивление, то возникающая фото-э. д. с. обеспечит протекание тока через это сопротивление при отсутствии внешнего источника (питающего напряжения). Таким образом, вентильные фотоэлементы являются генераторами, непосредственно преобразующими энергию света в электрическую без каких-либо затрат энергии внеших источников. К таким приборам относятся поликристаллические вентильные фотоэлементы и монокристаллические кремниевые фотоэлементы (солнечные батареи).

Вентильные фотоэлементы, работающие с приложением внешнего напряжения, называются фотодиодами. Следует, кстати, отметить, что фотодиоды могут использоваться в вентильном режиме без внешних источников питания. Приборы, работающие на принципе внутреннего фотоэффекта с внешним приложенным напряжением и осуществляющие внутреннее усиление фототока, называются фототранзисторами (фототриодами). Оба последних типа приборов являются фоточувствительными монокристаллическими полупроводниковыми приборами.

Наконец, промежуточными фотоприемниками в тракте передачи светового сигнала могут служить лазерные устройства, работающие в режиме усиления. В таких устройствах слабые световые сигналы преобразуются в мощные световые импульсы.

Фотоприемники с внешним фотоэффектом можно разделить на простые (двухэлектродные вакуумные фотоэлементы) и сложные (многоэлектродные фотоэлектронные приборы). Из числа последних наибольшее распространение получили фотоэлектронные умножители, работающие с внутренним усилением фототока при помощи вторичной электронной эмиссии. Внешний фотоэффект используется также в таких устройствах, как передающие телевизионные трубки изображения, преобразующие световые сигналы изображения в электрические импульсы, и в устройствах, получивших название электронно-оптических преобразователей, преобразующих световые сигналы одной спектральной области в световые сигналы другой спектральной области, усиленные по величине (яркости). Электронно-оптические преобразователи громоздки, недостаточно прочны и требуют высоковольтных источников питания, поэтому они применяются в основном для исследований и измерений в лабораторной практике.

Следует отметить, что в настоящее время применяются или

находятся в стадии разработки такие приборы, как фоточувствительные полевые транзисторы, полупроводниковые фотоэлектронные умножители и полупроводниковые светочувствительные переключатели типа *p-n-p-n*. В последние годы начали разрабатываться фотоэлементы, использующие фотоэлектромагнитные явления, а также явления, возникающие при неравномерном освещении полупроводников.

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом представляют собой большой класс приборов, широко используемых в схемах автоматики и в оптико-электронных ячейках и устройствах цифровых вычислительных машин. Переход электронов из невозбужденного состояния в зону проводимости требует меньших затрат энергии, чем процесс вырывания электронов с поверхности фотокатода, который имеет место в приборах с внешним фотоэффектом. Поэтому у фотоприемников с внутренним фотоэффектом длинноволновая граница области чувствительности сдвинута в инфракрасную область спектра, и эти приборы наиболее пригодны для работы именно в этой области. Внешний фотоэффект наблюдается при освещении как металлов, так и полупроводников, так как для этого необходимо лишь, чтобы энергия квантов света превосходила величину потенциального барьера на границе тела. Внутренний же фотоэффект проявляется только в полупроводниках и диэлектриках.

Фоторезисторы. Впервые изменение электрического сопротивления под действием света было обнаружено еще во второй половине прошлого века во время опытов с пластинкой из селена. В настоящее время материалом для изготовления фоторезисторов служит большое количество других полупроводников и их соединений (таких, например, как CdSe, CdTe, ZnS, PbS и др.). Чаще всего полупроводниковые материалы, применяемые для изготовления фоторезисторов, имеют поликристаллическую структуру. Сопротивление их намного выше (в отсутствие света), чем у металлов. Это сопротивление называется темновым сопротивлением. Большое значение темнового сопротивления объясняется тем, что в кристаллической решетке полупроводника число свободных или слабо связанных со своими атомами электронов мало. При освещении фоторезистора в нем под действием квантов световой энергии возникают свободные электроны и дырки. Эти носители электрических зарядов увеличивают ток проводимости через фоторезистор, снижая тем самым его сопротивление.

В наиболее распространенной конструкции фоторезистора на стеклянную пластину-подложку наносят тонкие полосы металла (золото, платину, серебро). Таких полос может быть две или несколько. В последнем случае они объединены в две группы, каждая из которых служит одним из внешних выводов фоторезистора. Поверх этих полос наносится тонкий слой фотопроводника, заполняющего и все промежутки между выводами. Обычно толщина фоточувствительного слоя не превосходит глубины проникновения света в толщу полупроводника. Сверху для защиты от внешних воздействий окружающей среды пластину покрывают слоем защитного лака, прозрачного для спектральной рабочей области фоторезистора. Затем пластину с выводами помещают в специальный корпус с двумя штырьками для включения в схему. В зависимости от применяемого для фоторезистора полупроводникового материала получают приборы с различными спектральными характеристиками. Спектральная чувствительность сернистоталлиевого фоторезистора, например, ох-

ватывает область от 0,6 до 1,2 *мк* с максимумом в области 0,9 *мк*. Для селенистосвинцовых, сернистосвинцовых и теллуристосвинцовых фоторезисторов граница спектральной чувствительности сдвинута в область 2—4,5 *мк*. Удельная чувствительность $S_{уд}$ фоторезисторов (*мка/лм · в*) определяется отношением изменения протекающего через него тока I к соответствующему изменению светового потока Ф при разности потенциалов $U=1$ *в* на выводах фоторезистора, т. е. $S_{уд}=\Delta I/\Delta\Phi$. Чувствительность фоторезисторов (*мка/лм*) при других значениях приложенного напряжения $S=S_{уд}U$. Чувствительность сернистосвинцовых фоторезисторов превосходит на порядок чувствительность электровакуумных фотоэлементов. А наибольшей максимальной чувствительностью обладают селенистокадмиевые фоторезисторы. Для них максимальная чувствительность достигает $9 \cdot 10^6$ *мка/лм*.

Чувствительность фоторезисторов увеличивается с понижением температуры, а спектральная характеристика смещается при этом в длинноволновую часть спектра. При снижении температуры до температур твердой углекислоты и жидкого воздуха чувствительность может увеличиться в несколько десятков раз по сравнению с ее значением при комнатной температуре. Повышение чувствительности сопровождается увеличением темнового сопротивления (до значений 10^7—10^8 *ом*) и ростом постоянной времени.

Фоторезисторы являются инерционными приборами. Время нарастания сигнала при подаче светового импульса у сернистокадмиевых и селенистокадмиевых резисторов составляет 0,2—100 *мсек*. А наилучший частотный предел у сернистосвинцовых фоторезисторов равен 1 *кгц*. Несмотря на такую инерционность фоторезисторов, они находят применение во многих промышленных устройствах управления технологическими процессами, в оптико-электронных устройствах цифровой индикации, где указанное быстродействие является вполне достаточным.

Вентильные фотоэлементы. Вентильные или фотовольтаические элементы (пластины) представляют собой полупроводниковые приборы, которые под действием света генерируют фото-э. д. с. Фотовольтаические элементы принципиально отличаются от остальных фотоприемников тем, что они непосредственно преобразуют световую энергию в электрическую. В вентильных фотоэлементах действие света приводит к возникновению и пространственному разделению образующихся электрических зарядов (электронов и дырок). Такое разделение возникших электрических зарядов приводит к образованию разности потенциалов на выводах фотоэлемента.

В одном из вариантов фотовольтаического элемента, использующего в качестве фоточувствительного слоя закись меди, основанием прибора служит пластина меди. На ее поверхности создают слой закиси меди. На поверхность слоя закиси меди наносится в виде тонкой золотой сетки второй электрод (первым служит сама пластина). На границе медь — закись меди и образуется вентильный слой. Свет, падающий со стороны сетчатого электрода, генерирует в слое закиси меди электроны, которые в результате сообщенной им энергии переходят в медную пластину через запорный слой. Последний не позволяет электронам из меди вернуться обратно в слой закиси меди. Таким образом, слой закиси меди заряжается положительно, а медная пластина, где скапливаются электроны, отрицательно. При подключении к такому фотоэлементу нагрузочного сопротивления в цепи будет протекать электрический ток.

Широкое распространение среди фотовольтаических элементов получили также селеновые фотоэлементы. Основанием такого фотоэлемента служит металлический диск толщиной 1—2 *мм* и диаметром в несколько сантиметров. Одну из его сторон покрывают тонким слоем (около 0,1 *мм*) селена типа *p* и на поверхность этого слоя затем наносят полупрозрачный электрод в виде золотой пленки. В процессе нанесения золотой пленки в селене возникает слой типа *n*. К полупрозрачному электроду прикрепляют выводное контактное кольцо, герметизируют диск пленкой влагостойкого лака и помещают его в пластмассовый корпус.

Спектральная характеристика селенового фотоэлемента достаточно близко совпадает со спектральной чувствительностью человеческого глаза. Последнее обстоятельство используется при светотехнических измерениях. При помощи дополнительного фильтра можно полностью совместить чувствительность селенового фотоэлемента с чувствительностью глаза.

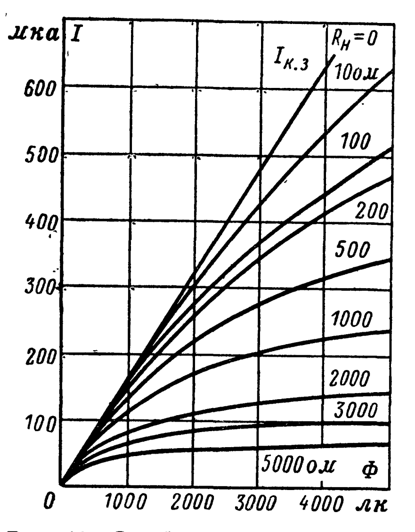


Рис. 10. Семейство световых характеристик селенового фотоэлемента в режиме короткого замыкания $I_{к.з}$ и при различных сопротивлениях нагрузки $R_н$.

На рис. 10 приведено семейство световых характеристик селенового фотоэлемента, показывающих зависимость тока I, генерируемого фотоэлементом, от светового потока Ф, падающего на его поверхность при различных сопротивлениях нагрузки $R_н$. Как видно из этого рисунка, зависимость выходного тока от падающего светового потока линейна только для режима короткого замыкания, т. е. при $R_н=0$. С ростом сопротивления нагрузки эта зависимость становится нелинейной. Другая световая характеристика, выражающая зависимость напряжения холостого хода $U_{х.х}$ от светового потока Ф, показана на рис. 11.

Фотовольтаические элементы обладают большой инерционностью и малым быстродействием, поэтому они могут работать лишь на частотах в несколько десятков герц. Их основное назначение — светоизмерения в статических режимах. Для оценки чувствительности фотовольтаического элемента используется крутизна (*мка/лм*) наклона световой характеристики в режиме короткого замыкания ($S = I_{к.з}/Ф$). Интегральная чувствительность селеновых фотоэлементов лежит в пределах 300—750 *мка/лм*. Чувствительность сернистосеребряных фотовольтаических элементов достигает 10 000—15 000 *мка/лм*.

Следует отметить, что в последние годы большое распространение получили кремниевые фотоэлементы. Эти фотоэлементы нашли применение в качестве источников питания (солнечных батарей), не-

посредственно преобразующих свет в электрический ток. Они также могут найти применение в оптико-электронных схемах, где не требуется высокое быстродействие.

Кремниевые фотоэлементы выполнены из монокристаллического кремния в виде дисков или прямоугольных пластин. Исходная проводимость пластин может быть типа *n* или *p* (рис. 12). В результате диффузии фосфора или мышьяка в толщу пластины с проводимостью типа *p* на ее поверхности образуется слой кремния типа *n*,

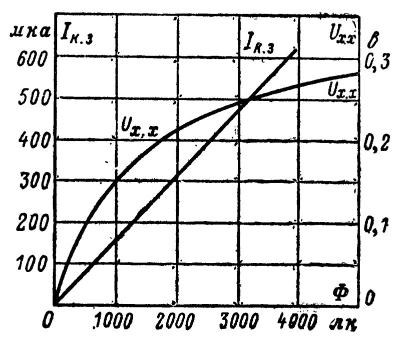


Рис. 11. Зависимость тока короткого замыкания $I_{к.з}$ и напряжения холостого хода $U_{х.х}$ селенового фотоэлемента от светового потока Ф.

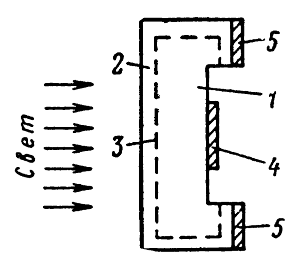


Рис. 12. Структура кремниевого фотоэлемента.

1 — кремний *p*-типа; *2*—кремний *n*-типа; *3* — *p-n* переход; *4* — контакт к области *p*; *5* — контакт к области *n*.

а на границе типа *n* и типа *p* кремния формируется *p-n* переход, чувствительный к свету. При попадании света на лицевую поверхность фотоэлемента в ней возникают электроны и дырки. Электроны свободно переходят в толщу кремния с проводимостью типа *n*, а дырки остаются в кремнии типа *p*. Таким образом, слой кремния типа *n* заряжается отрицательно, а пластина кремния типа *p* положительно. Фото-э. д. с. на разомкнутых выводах кремниевого фотоэлемента может достигать 0,5—0,7 *в*.

Вольт-амперная характеристика кремниевого фотоэлемента приведена на рис. 13. Максимальная выходная мощность его соответствует выходному напряжению 0,3—0,45 *в*. Спектральная характеристика кремниевого фотоэлемента показана на рис. 14. Наибольшая чувствительность фотоэлемента получается при длине волны 0,8—0,85 *мк*.

Фотодиоды. Другим типом фотоприемников, работающих на принципе внутреннего фотоэффекта и преобразующих энергию света в фото-э. д. с., являются фотодиоды. Если фотовольтаические приемники света работают в вентильном режиме, то фотодиоды могут работать как в вентильном, так и в фотодиодном режимах. Последний режим отличается тем, что на диод в обратном (запирающем) направлении подается напряжение смещения (обычные вентильные фотоэлементы не могут работать в фотодиодном режиме из-за малых значений обратных пробивных напряжений).

Фотодиоды изготавливаются из монокристаллического германия или кремния и имеют с вольтаическими фотоэлементами большое сходство. Конструктивно фотодиод представляет собой пластину

полупроводника, в которой сформирован *p-n* переход и имеются выводы от областей типа *n* и *p* (рис. 15) для включения фотодиода в схему. Пластина с выводами заключена в металлический корпус со стеклом в торце для прохождения света. Механизм образования

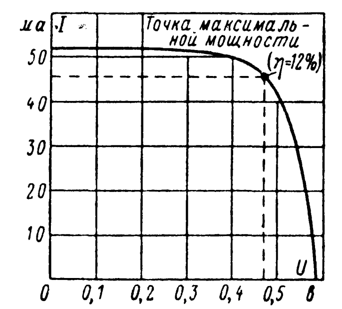


Рис. 13. Вольт-амперная характеристика кремниевого фотоэлемента.

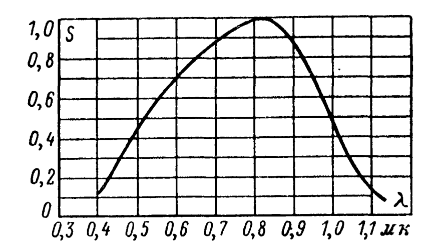


Рис. 14. Спектральная характеристика относительной чувствительности *S* кремниевого фотоэлемента.

фото-э. д. с. в фотодиодах примерно аналогичен процессу возникновения ее в вентильных фотовольтаических пластинах.

Фотодиоды находят широкое применение в оптико-электронных схемах автоматики и в современных цифровых вычислительных машинах.

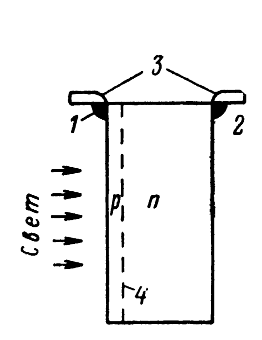


Рис. 15. Схематическое устройство фотодиода.

1 — контакт к области *p*; *2* — контакт к области *n*; *3* — выводы; *4* — *p-n* переход.

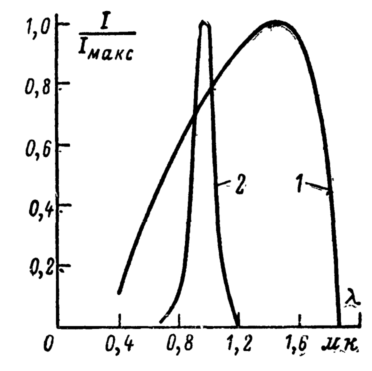


Рис. 16. Спектральные характеристики германиевого (*1*) и кремниевого (*2*) фотодиодов.

шинах. Они имеют малые габариты и вес, большой срок службы, достаточно высокое быстродействие и сравнительно большую интегральную чувствительность (не менее 3 000—20 000 *мка/лм*). На рис. 16 приведены спектральные характеристики германиевого и

кремниевого фотодиодов. Из этих характеристик видно, что наибольшая чувствительность кремниевых фотодиодов лежит в области 0,86—0,87, а германиевых в области 1,5 *мк*.

Спектральные характеристики фотодиодов в значительной мере зависят не только от технологических режимов изготовления (качества поверхности, глубины залегания *p-n* перехода), но и от режимов их работы в схеме (от напряжения смещения в фотодиодном режиме, от схемы включения фотодиода, от сопротивления нагрузки). При этом больше всего изменяется положение коротковолновой

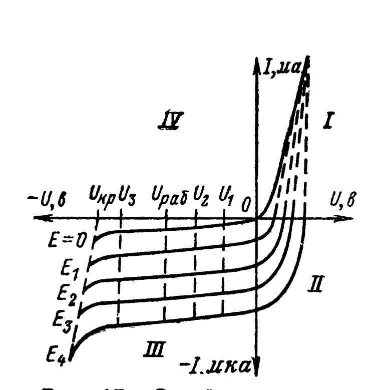


Рис. 17. Семейство вольт-амперных характеристик фотодиода.

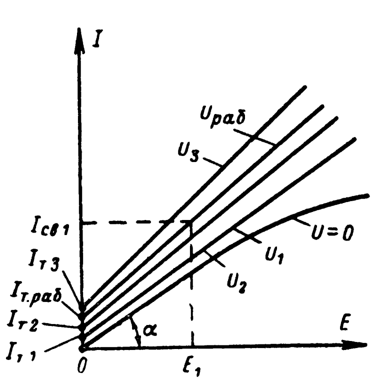


Рис. 18. Семейство световых характеристик фотодиода.

границы спектральной характеристики и ее максимума. Поэтому целесообразно при оценке серийно выпускаемых приборов пользоваться усредненными относительными спектральными характеристиками.

Другим важным параметром фотодиода является семейство вольт-амперных характеристик, показанных на рис. 17. Здесь квадрант *I* соответствует прямому включению фотодиода и характеристики эквивалентны характеристикам обычного полупроводникового диода, включенного в прямом направлении. В квадранте *II* приведены характеристики фотодиода в вентильном режиме. По горизонтальной оси отложены здесь значения фото-э. д. с. при различных освещенностях E и сопротивлении нагрузки $R_н = \infty$, причем $0 < E_1 < E_2 < E_3 < E_4$, а по вертикальной оси — значения фототока I при различных освещенностях и $R_н = 0$. В квадранте *III* изображены вольт-амперные характеристики фотодиода при его работе в фотодиодном режиме. Здесь на горизонтальной оси следует отметить две характерные точки: $U_{кр}$, соответствующую началу электрического пробоя фотодиода, и $U_{раб}$, которая является рабочей точкой прибора.

Вольт-амперная характеристика неосвещенного фотодиода ($E = 0$) называется темновой, а его ток при отсутствии освещения и соответствующем рабочем напряжении — темновым током $I_т$. Значение тока, соответствующее определенной освещенности фотодиода, называется световым током $I_{св}$, а разность между световым и темновым токами фототоком $I_ф = I_{св} - I_т$. Если по горизонтальной оси отложить значения уровней освещенности E (*лк*), а по вертикальной оси значения соответствующих токов I (*мка*) при постоянных зна-

чениях напряжения смещения на фотодиоде и $R_н=0$, то получится семейство световых характеристик фотодиода (рис. 18).

По световой характеристике можно определить интегральную (токовую) чувствительность фотодиода $S_у$, которая выражается приращением тока ΔI (*мка*), текущего через фотодиод, к соответствующему приращению светового потока $\Delta\Phi$ (*лм*):

$$S_у=\frac{\Delta I}{\Delta\Phi}=\frac{I_{св}-I_т}{\Delta\Phi}=\frac{\Delta I_ф}{\Delta ES},$$

где ΔE — приращение освещенности (*лк*);

S — светочувствительная площадка (*м*²).

Параметры германиевых и кремниевых фотодиодов зависят от окружающей температуры. В первую очередь этому влиянию под-

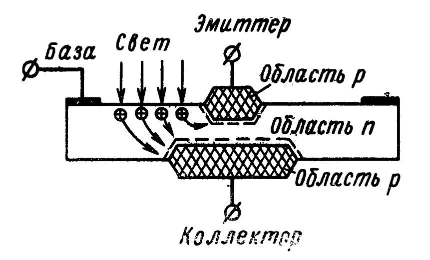


Рис. 19. Устройство фототранзистора.

Рис. 20. Схема включения фототранзистора с общим эмиттером и «оборванной» базой.

вержены темновой ток и, следовательно, чувствительность фотодиода.

Постоянная времени, характеризующая частотные свойства фотодиода, определяется сопротивлением нагрузки последнего и режимом его работы. Поэтому при оценке быстродействия фотоприемника по его постоянной времени необходимо учитывать нагрузку, для которой приводится эта постоянная времени.

Фототранзисторы. Эти приборы совмещают в себе функции фотодиода и усилителя фототока. Поэтому их интегральная чувствительность выше, чем у фотодиодов, и может достигать нескольких ампер на люмен. Устройство фототранзистора показано на рис. 19. Конструктивно и по принципу действия он имеет много общего с обычным транзистором. Фототранзистор также состоит из трех областей полупроводника с чередующимися типами проводимости (*n-p-n* или *p-n-p*), называющимися соответственно эмиттер, база и коллектор. Следует отметить, что в отличие от обычных транзисторов с тремя выводами некоторые фототранзисторы могут иметь два внешних вывода: эмиттер и коллектор (фототранзисторы с «оборванной» базой).

Остановимся на принципе работы фототранзистора. На рис. 20 приведена схема включения фототранзистора с общим эмиттером и «оборванной» базой. Когда фототранзистор не освещен, через него протекает ток, определяемый неосновными носителями, инжектиро-

ванными из эмиттера, прошедшими базу и достигшими коллектора. Несмотря на то, что переход база — эмиттер включен в прямом направлении, количество дырок, инжектированных эмиттером в базу, невелико, а сам ток фототранзистора мал. Объясняется это накоплением дырок в базе, вызванным отсутствием компенсирующих отрицательных зарядов, которые не могут туда поступать из-за ее «обрыва».

При освещении области базы в ней образуются электронно-дырочные пары. При этом дырки диффундируют к эмиттеру и коллектору. Дырки, прошедшие в область коллектора, увеличивают его ток, а электроны создают избыточный нескомпенсированный отрицательный объемный заряд, уменьшающий величину потенциального барьера перехода эмиттер — база и вызывающий резкое увеличение потока дырок из эмиттера в область базы. Эти дырки, пройдя базовую область, попадают в коллектор и еще больше увеличивают ток фототранзистора, причем ток за счет дырок, вызванных возникновением отрицательного объемного заряда в области базы, превосходит значение тока, определяемого дырками, генерированными в базе первоначально под действием света. Так происходит усиление фототока. Этим и объясняется большая интегральная чувствительность фототранзистора по сравнению с фотодиодом.

Существуют конструкции фототранзисторов, у которых освещается либо область коллектора, либо область эмиттера. Для нормальной работы таких фототранзисторов необходимо, чтобы толщина области коллектора или эмиттера была значительно меньше длины свободного пробега электронов в них.

Выходные характеристики фототранзистора, включенного по схеме с общим эмиттером и «оборванной» базой при освещении базы, аналогичны выходным характеристикам обычного транзистора, работающего в режиме с общим эмиттером. При этом роль управляющих базовых токов играют световые сигналы разной интенсивности. По семейству выходных характеристик фототранзистора можно определить его интегральную чувствительность $S_ф = \Delta I_ф / \Delta \Phi$.

При наличии базового вывода его можно использовать для выбора начального режима и стабилизации рабочей точки фототранзистора при изменении окружающей температуры. Влияние окружающей температуры в первую очередь сказывается на величине темнового тока. По частотным характеристикам фототранзисторы уступают фотодиодам. Постоянная времени фототранзистора по схеме с общим эмиттером увеличивается приблизительно в $(\beta+1)$ раз, где β — коэффициент усиления фототранзистора в режиме с общей базой.

Другие фоточувствительные приборы. В настоящее время большое внимание уделяется разработке быстродействующих приемников света. Существует ряд направлений получения быстродействующих светочувствительных приборов. Повышения быстродействия фотодиодов, например, можно добиться путем сведения к минимуму толщины базы (до 0,4—2 *мк*). Быстродействие такого фотодиода определяется временем диффузии неосновных носителей в области базы.

Интересны фотодиоды с *p-i-n* структурой, представляющие собой полупроводниковые диоды, у которых между областями *p* и *n* заключена область *i* полупроводника с собственной проводимостью. Принцип работы этих приборов заключается в следующем. Путем подачи большого напряжения смещения (в запирающем направле-

нии) область запорного слоя расширяется так, что охватывает всю область *i*. Это приводит к возникновению в ней постоянного электрического поля. Структура *p-i-n* выполнена из материала с малым коэффициентом поглощения с таким расчетом, чтобы свет поглощался в слое *i*. При этом в области *i* образуются электронно-дырочные пары. Под действием приложенного напряжения, которое близко к напряжению лавинного пробоя, носители, сталкиваясь с решеткой, выбивают из нее новые носители, в результате чего происходит лавинное увеличение тока через фотодиод. Граничная частота работы прибора определяется скоростью пролета электронов ($8 \cdot 10^6$—$2 \cdot 10^7$ *см/сек*). При толщине слоя *i* в 10 *мк* время пролета составляет $1{,}3 \cdot 10^{-10}$—$5{,}2 \cdot 10^{-11}$ *сек*, что соответствует частоте 3,5—8,7 *Ггц*.

На базе высокочастотных фотодиодов с *p-i-n* структурой могут быть разработаны приборы, которые могут стать полупроводниковыми твердотельными аналогами фотоэлектронных умножителей. Фотодиоды с *p-i-n* структурой имеют лучшее отношение сигнал/шум благодаря лавинному умножению при ударной ионизации. Зарубежные специалисты считают, что приборы этого типа со временем могут даже превзойти по чувствительности и быстродействию фотоэлектронные умножители.

Светочувствительными приборами, обладающими усилением, являются также переключатели, управляемые светом, относящиеся по существу к кремниевым управляемым выпрямителям со световым управлением.

Кремниевый переключатель, управляемый светом, представляет собой переключательный полупроводниковый прибор типа *p-n-p-n*, в котором вместо обычно применяемого для управления кремниевого выпрямителя электрического сигнала используется падающий свет, иногда в сочетании с электрическим сигналом. Энергия запускающего светового сигнала для переключателя, как правило, невелика. После включения прибора его сопротивление падает на несколько порядков, и энергия на выходе достигает очень большой величины. При этом напряжение на приборе уменьшается до величины, соответствующей стационарному включенному состоянию. Ток через прибор возрастает от пренебрежимо малой величины до значения, которое фактически определяется параметрами внешней цепи. Уменьшение напряжения при росте тока свидетельствует о наличии внутреннего отрицательного сопротивления прибора. Усиление прибора определяется отношением выходной энергии к входной и обусловлено этим отрицательным сопротивлением. Постоянная времени прибора лежит в пределах 10—100 *мксек*.

Такие приборы могут найти применение в качестве светоуправляемых мощных полупроводниковых реле при изменении выходной мощности в широких пределах. А способность переключателя, управляемого светом, находиться в двух различных устойчивых состояниях (при работе в схемах постоянного тока) позволяет использовать его в качестве элемента памяти оптико-электронных логических схем.

3. ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ

Использование при построении оптических и оптико-электронных схем и устройств лазеров или люминесцентных диодов с устройствами для фокусировки и концентрации световых потоков в ряде слу-

чаев не требует дополнительных устройств для канализации оптических потоков или импульсов внутри устройства. Не обязательно применять такие устройства и в том случае, когда источник и приемник света располагаются очень близко друг к другу и потери света при таком конструктивном решении незначительны. Применение ряда оптически прозрачных диэлектриков в промежутке между, например, излучающим диодом и фотодиодом иногда бывает полезным для уменьшения потерь света за счет полного внутреннего отражения на границе раздела двух сред (тело излучающего кристалла и воздух). В этом случае целесообразно пространство между ними заполнять светопроводящей средой с коэффициентом преломления, близким к коэффициенту преломления тела излучателя.

При осуществлении оптической коммутации в оптических и оптико-электронных схемах и устройствах бывает необходимо использовать светопроводящие каналы, локализующие световые потоки.

Наибольшее распространение для целей оптической коммутации в последние несколько лет получили пассивные волоконные световоды. Они являются в настоящее время наиболее перспективными компонентами оптических трактов в схемах и устройствах в связи с целым рядом положительных качеств. К таким качествам следует отнести малые габариты, простоту обращения с ними, возможность значительного изгибания волокон без нарушения условий хорошего пропускания, что позволяет осуществлять оптическую коммутацию практически между любыми точками схем, включая интегральные твердые схемы. В сравнении с высокочастотными коаксиальными кабелями волоконные световоды обладают заметно меньшим удельным коэффициентом затухания. Затухание в типичном пассивном волокне составляет 1,1 *дб/м*, в то время как у коаксиального кабеля на частоте 1 *Ггц* оно доходит до 1,8 *дб/м*.

Устройство и принцип работы волоконных световодов. Рассмотрим подробней конструкцию и принцип работы волоконных световодов и некоторых изделий из них. Заметим, что подробные сведения о технологии изготовления, конструктивных особенностях и свойствах волоконных световодов и изделий из них можно найти в целом ряде работ.

Под волоконным световодом понимается отдельное волокно или система определенным образом уложенных волокон, концы которых закреплены, а торцы обработаны (как правило, торцевая плоскость волоконного световода хорошо отполирована). Отдельное волокно (моноволокно) состоит из жилы (стержня), выполненной из оптического стекла с показателем преломления $n_{ж}$, и оболочки из стекла с показателем преломления $n_{об}$, причем обязательно должно выполняться соотношение $n_{об}<n_{ж}$ (рис. 21). Указанное требование следует из физического принципа работы световода, основанного на явлении полного внутреннего отражения света на границе двух сред с различными значениями показателей преломления.

Как будет показано ниже, соотношение между показателями преломления оболочки и жилы влияет на оптические характеристики световодов. В принципе в стеклянном волокне без оболочки также выполняется условие полного внутреннего отражения, причем критический угол оказывается больше, так как показатель преломления воздуха $n_0=1$ и меньше $n_{ж}$ и $n_{об}$. Тем не менее применение оболочки необходимо. Она защищает жилу от возможных повреждений и загрязнений, что обеспечивает малые потери света при отражениях, и, что самое главное, наличие оболочек у волокон позволяет реали-

зовать одно из самых важных достоинств волоконных световодов и изделий из них, а именно не просто канализировать свет, а передавать изображение с достаточно высокой разрешающей способностью. Наличие оболочки у каждого из моноволокон, из которых изготовлено то или иное изделие, препятствует взаимному просачиванию света из волокна в волокно. Если толщина оболочки каждого волокна примерно составляет длину волны распространяющегося по волокну света, то просачивание практически отсутствует. На практике толщину оболочки чаще делают раза в два меньше указанной; при этом качество изображения остается достаточно хорошим.

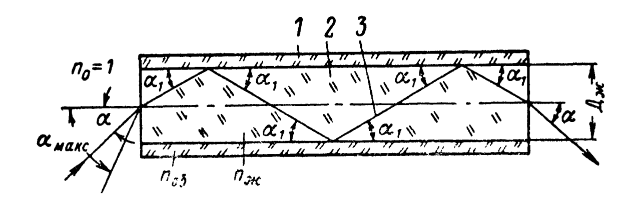


Рис. 21. Ход светового луча в стеклянном оптическом волокне.

1 — оболочка волокна с показателем преломления $n_{об}$; 2 — внутренняя жила волокна диаметром $D_ж$ с показателем преломления $n_ж$; 3 — траектория светового луча; $n_0=1$ — коэффициент преломления воздуха; α — угол падения светового луча на входной торец волокна; $\alpha_{макс}$ — максимальный апертурный угол; α_1 — угол между образующей цилиндра волокна и направлением светового луча.

В некоторых изделиях волоконной оптики волокна имеют еще и вторую оболочку, как правило, черного цвета, поглощающую свет, так или иначе просочившийся из центральных жил световодов. Отметим, что использование изделий из стекловолокон, у которых имеются вторые оболочки, обладающие сильным поглощением в видимом участке спектра, оказывается очень желательным в различных индикационных панелях или табло, располагающихся в местах с нормальной освещенностью. Использование, например, плоских планшайб в экранах телевизоров позволило бы получить четкое изображение в условиях нормального дневного освещения.

Трудности изготовления стеклянных волокон заключаются в специфике технологии. Часто оказывается, что спектральные характеристики массивных стекол и волокон, изготовленных из них, сильно различаются. Связано это, по-видимому, со структурными изменениями материала, происходящими при изготовлении волокна. Трудности заключаются еще и в том, что стекла для жилы и оболочки нужно подбирать не только по спектральным характеристикам и соответствующим коэффициентам преломления. Для получения высококачественного волокна, обладающего к тому же достаточно высокой механической прочностью, материалы жилы и оболочки должны соответствовать друг другу по вязкости, температуре плавления и коэффициенту термического расширения. Кроме того, они должны быть химически совместимы. Все это влияет на целый ряд характе-

ристик световодов и других изделий, выполненных из группы волокон.

Механическая прочность моноволокон оценивается тем выше, чем при меньшем радиусе кривизны при его изгибе и, с другой стороны, при большем усилии на разрыв наступает его разрушение.

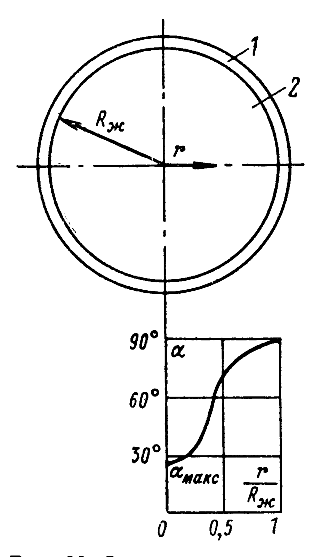


Рис. 22. Зависимость максимального апертурного угла α от отношения $r/R_ж$.

1 — оболочка волокна; 2 — жила волокна (в поперечном сечении).

Характеристики световодов. Основными оптическими характеристиками световодов являются апертурный угол, светопропускание и разрешающая способность.

Максимальный апертурный угол $\alpha_{макс}$ — это наибольший угол между лучом в воздухе и нормалью к торцу световода, при котором луч, претерпевая многократное полное внутреннее отражение от оболочки, пройдет по жиле моноволокна. Как видно из рис. 21, для меридионального луча (луча, лежащего в плоскости, проходящей через ось моноволокна) этот угол

$$\alpha_{макс} = \arcsin \sqrt{n_ж^2 - n_{об}^2}.$$

Если луч лежит в параллельной плоскости на расстоянии $r \leqslant R_ж$ (рис. 22), где $R_ж$ — радиус жилы волокна, то он встретит поверхность оболочки под меньшим углом. Это означает, что для такого луча условие полного внутреннего отражения будет выполняться при больших углах наклона, чем для меридионального луча. Следовательно, максимальный апертурный угол для меридионального луча всегда меньше, чем для прочих лучей. Для лучей, не лежащих в меридиональной плоскости, максимальный апертурный угол может в пределе достигать 90°, что и показано на рис. 22.

Немеридиональные лучи распространяются в волокне по спиралеобразной ломаной траектории, что приводит к значительной деполяризации излучения на выходном конце световода. Деполяризация растет с увеличением количества отражений, т. е. с уменьшением отношения длины волокон к диаметру их жилы. Это затрудняет использование световодов из волокон круглого сечения для передачи поляризованных световых потоков, что необходимо учитывать при разработке оптических и оптико-электронных схем.

Светопропускание элементарного волокна или световода определяется отношением Φ_1/Φ_0, где Φ_1 — световой поток на выходе световода, а Φ_0 — световой поток, падающий на вход световода в пределах его световой апертуры.

Потери световой энергии в моноволокне складываются из поглощения света самим стеклом жилы, а также поглощением на границе жилы и оболочки при отражениях. Поэтому светопропускание зависит в определенной степени от апертурного угла световода, т. е.

от соотношения показателей преломления жилы и оболочки. Поглощение уменьшается с уменьшением конусности падающего на входной торец световода луча.

Светопропускание световода всегда меньше, чем светопропускание моноволокна, что связано в основном со степенью заполнения сечения световода световедущими жилами. Свет, попавший в пространство между жилами, в значительной степени поглощается и рассеивается.

В конических моноволокнах (монофоконах) и изделиях из них (фоконах) потери света зависят от того, какой торец фокона входной, а какой выходной. Потери от торца с большим диаметром к меньшему значительно меньше, чем от меньшего к большему. Это связано со значительной разницей в апертурных углах (светопропускание сильно зависит от геометрических соотношений конических волокон).

Как уже говорилось, светопропускание моноволокна всегда больше, чем светопропускание световода из-за того, что световой поток, попавший на торцы оболочек, практически теряется. Поэтому если известно светопропускание отдельных волокон, из которых изготовлен световод (или планшайба, фокон и т. п.), то пропускание последнего можно вычислить, зная коэффициент (долю) отражения от торцов и коэффициент заполнения световода. Учет этих потерь, дает уменьшение светопропускания световода примерно на 10—20% по сравнению со светопропусканием отдельного волокна.

Спектральная характеристика светопропускания должна учитывать спектральные свойства материала жилы и спектральную характеристику потерь, возникающих на границе жилы и оболочки волокна.

Разрешающая способность световода, определяемая тем же методом, что и для обычной оптики, характеризуется числом оптических линий на 1 *мм* поля изображения. Очевидно, что чем меньше диаметр волокон и чем плотней укладка их концов, тем выше разрешающая способность световодов. Если диаметр волокна близок к длине волны света, то волокно будет обладать волноводными свойствами. При этом в зависимости от соотношений диаметра волокна и длины волны светового потока потери в световоде могут быть либо очень велики, либо, наоборот, очень малы. Однако изготовление волокон малого диаметра и их регулярная укладка достаточно сложны. Поэтому получение волоконных световодов с большой разрешающей способностью затруднительно. Большинство из полученных в настоящее время световодов имеет максимальную разрешающую способность порядка ста, а лучшие образцы — несколько сотен линий на миллиметр.

При использовании световодов необходимо принимать во внимание также их импульсные свойства. Размазывание световых сигналов при прохождении через световод происходит в большей или меньшей мере в зависимости от апертурного угла или конусности падающего на торец световода луча, от длины световода и от отношения его длины к диаметру жилы.

Если, например, на входной торец световода падают идеальные прямоугольные импульсы света с конусностью, например, $2\alpha°$, причем угол α меньше апертурного угла, то размытость сигнала определяется величиной запаздывания между пучком света, распространяющимся вдоль осевой линии световода, и пучком, распространяющимся под углом α к этой осевой линии. В первом случае пучок света

проходит световод за время $t_1 = L/c$, где L — длина световода, а c — скорость распространения света в стекле его жилы. Во втором случае, претерпевая многократные отражения от оболочки световода, пучок света проходит расстояние $L/\cos\alpha$, а это значит, что он окажется у другого торца световода через время $t_2 = L/c\cos\alpha$. Следовательно, запаздывание между этими пучками света составит время

$$\tau_з = \frac{L(1 - \cos\alpha)}{c\cos\alpha}.$$

Это означает, что нельзя пропускать через такой световод прямоугольные импульсы, если интервалы между ними сравнимы или меньше рассчитанного времени запаздывания.

Искажение формы импульсов света происходит, кроме того, из-за разного поглощения лучей, распространяющихся под различными к осевым линиям волокон световода углами. С увеличением этого угла растет как общая длина пути света, так и число отражений от границы жилы с оболочкой, т. е. возрастают потери света. Максимальное число отражений N при заданных конусности светового луча $2\alpha°$ и длине световода L прямо пропорционально отношению $L/D_ж$, где $D_ж$ — диаметр жилы волокна, а именно (см. рис. 21):

$$N = \frac{L}{D_ж}\operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{L}{D_ж}\frac{\sin\alpha_1}{\sqrt{n_ж^2 - \sin^2\alpha}}.$$

Добавка в стекло жилы волокна соответствующих активных присадок, таких, как, например, неодимий, позволяет получить активное волокно, обладающее при определенных условиях свойствами оптического усилителя или даже генератора. Подобные активные волокна в соответствующих условиях способны на выходе выдавать импульсы света определенных и идентичных параметров при значительном допустимом разбросе в параметрах входных импульсов. На таких активных формирующих волокнах можно строить логические цепи, получившие название нейристоров. Использование активных волокон в качестве оптических усилителей может оказаться весьма эффективным, так как усиление слабых сигналов в активном волокне составляет примерно 10^4 на длине 1 *м*.

Если при собирании в жгуты, т. е. при формировании световодов, волокна распределяются на одном и другом торце строго в одинаковом порядке, то световоды называются регулярными или когерентными. Такие световоды позволяют передавать изображения. Световоды с нерегулярной укладкой волокон на торцах называются нерегулярными или некогерентными. Волоконно-оптическая система со случайным распределением волокон представляет собой разветвленный на одном конце нерегулярный световод. Благодаря случайному распределению волокон выход из строя одного или нескольких источников света не вызывает затемнения отдельных площадок на торце световода, и, следовательно, не нарушается его нормальное функционирование, что было бы трудно осуществить при регулярной укладке волокон.

Перераспределяя соответствующим образом волокна на одном и другом торцах и формируя геометрию торцов, получают всевозможные преобразователи изображения. Кроме рассмотренных гибких волоконных световодов, известны в настоящее время и другие изделия из стекловолокна, такие, например, как планшайбы, фоконы и фоклины, преобразователи линейного изображения в круговое и др.

Планшайбы, или плавленые пластины, представляют собой полированные с торцов наборы коротких волокон. Толщина таких планшайб около сантиметра, а площадь их может доходить до сотен квадратных сантиметров. Многие типы планшайб обеспечивают вакуумплотное соединение волокон, и использование их очень вы-

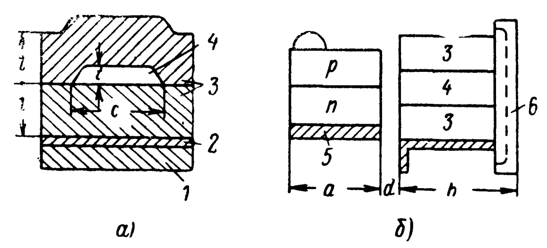


Рис. 23. Схематическое устройство передающей оптической тонкопленочной линии.

а — поперечный разрез линии (*1* — стеклянная подложка; *2* — слой алюминия; *3* — слой из окиси кремния; *4* — светопроводящий слой из окиси магния); *б* — вид сбоку на систему: источник (светоизлучающий диод *5*) — тонкопленочная передающая линия (*3* и *4*) — кремниевый фотодиод (*6*).

годно для устройств, в которых должны быть обеспечены высокая численная апертура, отсутствие ореолов и хорошее разрешение и контрастность.

Фоконом или конусом, служащим для преобразования изображения или яркости, называют одно волокно или жесткую систему волокон, имеющих форму усеченного конуса с отполированными торцами. Фоконы позволяют преобразовывать большое изображение в апертуре с малым числовым коэффициентом в малое изображение в апертуре с большим коэффициентом. Диаметр узкого торца фокона может быть примерно в 4—5 раз меньше диаметра широкого конца, который может достигать 50 *см*. Разрешающая способность лучших фоконов составляет 200 линий на миллиметр. Фоклины отличаются от фоконов тем, что имеют прямоугольные профили торцов. Иногда и фоклины называют фоконами, так как принципы их работы аналогичны.

Разрешающая способность волоконных изделий может достигать нескольких сотен линий на миллиметр. В настоящее время проводятся большие работы по созданию волоконных световодов, пропускающих как в ультрафиолетовом и видимом, так и в инфракрасном участке спектра.

Для осуществления оптической связи, в особенности в интегральных твердых схемах, по-видимому, могут эффективно использоваться тонкопленочные светопередающие линии. Схематическое устройство такой линии вместе с источником (светоизлучающий

диод) и приемником (кремниевый фотодиод) показано на рис. 23. При геометрических значениях $t=3{,}81$ *мк*, $l=4{,}5$ *мк*, $d=75$ *мк*, $h=1$ *см*, $c=0{,}25$ *мм* и $a=0{,}75$ *мм* коэффициент связи между источником и приемником света примерно в 100 раз больше, чем в том случае, когда тонкопленочный световод отсутствует.

4. ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МОДУЛЯТОРЫ СВЕТА

Развитие вычислительной техники идет в направлении повышения быстродействия и надежности, увеличения емкости запоминающих устройств, совершенствования логических структур. Значительное внимание в настоящее время уделяется также вопросам совершенствования устройств ввода и вывода информации цифровых вычислительных машин и систем, а также устройств индикации и отображения. Применение волн оптического диапазона и фоточувствительных материалов в целом ряде случаев позволило успешно подойти к решению перечисленных задач и прежде всего позволило вести работы по созданию новых видов запоминающих устройств постоянного типа.

Значительный интерес представляет возможность создания запоминающих устройств путем использования когерентных источников света и фоточувствительных материалов для записи и считывания информации. Удельная емкость такого запоминающего устройства может быть очень большой и достигать 10^{12}—10^{13} двоичных единиц информации на кубический сантиметр. Так, например, запоминающее устройство сверхбольшой емкости (10^{12} двоичных единиц информации), разработанное за рубежом, использует в качестве носителя информации прозрачные пластмассовые диски, покрытые специально разработанной фоточувствительной эмульсией с разрешающей способностью 2 000 линий на миллиметр. Характерно, что обработка диска после экспонирования длится десятые доли секунды с возможностью многократных экспозиций и проявлений, что позволяет заполнить диск в несколько приемов. Засветка производится гелий-неоновым лазером мощностью 27 *мвт*. Модуляция луча осуществляется устройством, работающим на основе использования эффекта Керра. Скорость записи может достигать 500 000 двоичных единиц в секунду. Помимо требования когерентности источников света при реализации такого типа запоминающих устройств важным является требование высокой разрешающей способности фоточувствительного носителя.

Волны оптического диапазона и фоточувствительные материалы могут найти применение в разработках новых логических структур цифровых вычислительных машин и в частности таких структур, в которых инверсия, передача, сдвиг и наложение, а также ввод и вывод информации производятся целыми массивами (картинами) информации параллельно без последовательной выборки. Такая логическая структура получила название картинной логики или картинной арифметики. Использование когерентных и некогерентных источников света и фоточувствительных материалов в качестве транспарантов позволяет создавать устройства для выполнения некоторых математических преобразований (решение задачи фильтрации, интегрирования и умножения, решение уравнений Фурье, Лапласа и др.), представляющих интерес для практической инженерной работы.

Однако использование обычных фотоэмульсионных материалов ограничивается рядом неудобств. Во-первых, требуется кропотливая и относительно продолжительная их обработка (например, проявление, фиксация, сушка и т. п.). Во-вторых, однажды обработанная фотопленка или иное фотоэмульсионное изделие, как правило, не могут быть использованы вторично и не позволяют в случае необходимости заменять информацию, так как фотопроцесс необратим. Разрешающая способность обычных фотоэмульсий, кроме того, ограничивается размерами кристаллов серебра, в лучшем случае имеющих сечение порядка микрона, что в ряде случаев недостатсчно.

Фоточувствительные материалы на основе фотохромных соединений лишены указанных недостатков. Они не требуют проявления и фиксации, позволяют оптическими методами (иногда также нагреванием) многократно стирать старую, а затем записывать любую новую информацию. Разрешающая способность этих материалов соизмерима с размерами молекул.

Интерес к оптическим методам записи, хранения и считывания информации при использовании фоточувствительных материалов типа фотохромных исключительно широк. Обратимость фотохромного процесса и малые значения времени фотопереходов делают фотохромные соединения особенно привлекательными для использования их в устройствах и схемах оптико-электроники, в первую очередь в запоминающих устройствах цифровых вычислительных машин, а также устройствах индикации и отображения.

При построении систем записи, считывания, индикации и отображения информации с использованием фоточувствительных материалов весьма существенной является проблема модуляции, сканирования и точного координатного отклонения светового пучка. Неслучайно поэтому фотохромные материалы считают наиболее подходящими для использования их в простых быстродействующих запоминающих устройствах большой емкости и практически неограниченного срока службы, а электрооптические кристаллы — для развертки и координатного отклонения светового пучка при записи и считывании информации. Плотность размещения информации на фотохромном носителе оценивается величиной порядка 10^{14} двоичных единиц на квадратный сантиметр, а достигнутая в настоящее время скорость двоичного переключения направления луча света с модуляторами на электрооптических кристаллах дигидрофосфата калия составляет частоту 1—2 *Мгц*.

Остановимся подробнее на явлении фотохромии, а также рассмотрим способы и средства модуляции световых потоков.

Фотохромные материалы. Фотохромными химическими соединениями называют такие вещества, которые при определенных условиях обратимо изменяют свой цвет при поглощении света определенной длины волны. Упрощенная схема фотохимической реакции имеет вид:

$$A \underset{\lambda_2}{\overset{\lambda_1}{\rightleftarrows}} B,$$

где A — исходное состояние (исходная фотоформа);

B — индуцированное состояние (индуцированная фотоформа).

Спектры поглощения, характерные для исходной и индуцированной фотоформ, показаны на рис. 24. В ряде случаев фотохромное

соединение из состояния *В* может перейти в фотохимически необратимое состояние, что, как правило, является нежелательным для практического использования. Состояние *В* может быть очень коротким или, наоборот, достаточно длительным и устойчивым во времени (несколько часов или даже месяцев).

Известны различные механизмы фотохромных превращений (фотоперегруппировка, фотоприсоединение, фотодиссоциация и др.). Все фотохромные реакции, несмотря на разные механизмы, приводят к бистабильным состояниям *А* и *В* с возможностью взаимного перехода. При этом изменяются атомные, электронные или молекулярные связи. Как правило, наблюдаемые при этом спектральные сдвиги лежат в пределах между ультрафиолетовой и видимой областями спектра.

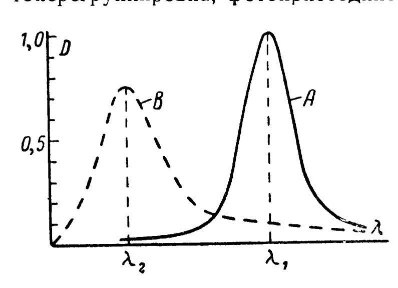


Рис. 24. Спектры поглощения фотохромного соединения.

А — спектр исходной фотоформы; *В* — спектр индуцированной фотоформы; *Д* — оптическая плотность.

Большинство из фотохромных соединений (таких, как спиропираны, анилиды, индигоиды) являются органическими соединениями. Неорганические фотохромные соединения встречаются значительно реже. Свойства и характеристики фотохромных систем в значительной мере зависят от растворителя, температуры, концентрации. Ряд соединений проявляет фотохромные свойства, будучи введенным тем или иным способом в различные полимерные пленки или пластины. Другие обладают фотохромными свойствами только в виде жидких растворов. В последнем случае для практических целей возможно изготовление пластины, содержащей мелкие прозрачные капсулы с раствором фотохромного соединения.

Фотохромные материалы можно характеризовать следующими параметрами: спектральными характеристиками и оптической плотностью, скоростью прямого и обратного фотопереходов, степенью обратимости и условиями, обеспечивающими длительный или, наоборот, быстрый обратный переход. Следует особенно подчеркнуть влияние температуры на скорость переходов. В целом ряд случаев переход из одного состояния в другое возможен в результате нагревания (охлаждения). Это явление, называемое термохромией, может быть также использовано при построении тех или иных устройств.

Максимумы поглощения обеих фотоформ, ширина и форма полос поглощения для различных веществ определяются их спектральными характеристиками. Для одних соединений, например спиропиранов, исходная фотоформа лежит в ультрафиолетовой, а индуцированная в видимой области, для других (индигоиды) исходная фотоформа лежит, наоборот, в более длинноволновой области.

Оптическая плотность изделия из фотохромного соединения определяется формулой $D = \lg \Phi_0/\Phi_1$, где Φ_0—падающий, а Φ_1—прошедший световой поток. Величина *D* сильно зависит от концентрации фотохромного соединения, а также от температуры.

Принцип работы фотохромного изделия при построении различных схем заключается в том, что воздействующее излучение с дли-

ной волны λ_1 (см. рис. 24) переводит его в состояние с максимумом поглощения на длине волны λ_2 и наоборот. При построении оптической оперативной или полупостоянной памяти особое значение имеют скорости прямого и обратного переходов. Динамика переходов (кроме применяемого типа фотохромного соединения, его температуры и концентрации) сильно зависит от мощности воздействующего светового излучения. Чем выше мощность излучения, тем быстрее протекает реакция.

Существенной проблемой является «усталость» фотохромных изделий. Это явление проявляется в том, что либо с течением времени, либо с увеличением числа прямых и обратных переходов наблюдается ослабление фотохромного свойства. По-видимому, это связано с протеканием каких-либо необратимых сопутствующих реакций. На указанное обстоятельство необходимо обращать серьезное внимание. Для устройств и схем длительного применения, например для оперативных запоминающих устройств цифровых вычислительных машин и динамических систем отображения, фотохромные соединения, проявляющие «усталость», в принципе непригодны.

Модуляторы света. Для преобразования светового потока того или иного источника света в носителя информации в цифровых вычислительных машинах или устройствах связи необходимо управление определенными параметрами светового пучка. Такими параметрами могут быть частота, интенсивность, направление в пространстве и т. п. Управление световым пучком может осуществляться в процессе его генерации в активном веществе оптического квантового генератора, а также после того, как пучок вышел из него. В первом случае модуляция называется внутренней, а во втором внешней. Как уже упоминалось, в полупроводниковых источниках света возможна достаточно эффективная внутренняя модуляция. Для других типов генераторов, как правило, применяется внешняя модуляция.

Внешняя модуляция может быть осуществлена различными способами: изменением поглощения свободными носителями в полупроводниках; вращением плоскости поляризации светового излучения под воздействием магнитного поля (магнитооптический эффект Фарадея) либо под воздействием электрического поля (линейный электрооптический эффект Поккельса или квадратичный электрооптический эффект Керра) и др.

Для получения достаточно большой глубины модуляции с помощью магнитооптического эффекта Фарадея, как правило, требуются очень сильные магнитные поля. Наиболее перспективными для модуляции, а также для отклонения световых пучков оказались электрооптические устройства.

Рассмотрим основные принципы построения такого вида модуляторов и устройств дискретного отклонения на основе кристаллов дигидрофосфата калия, обладающих продольным электрооптическим эффектом Поккельса.

Указанный эффект проявляется в следующем (рис. 25). При нормальном падении линейно поляризованного пучка на прозрачный кристалл, разрезанный перпендикулярно оптической оси, пучок расщепляется в направлении кристаллографических осей x' и y'. Оптическая длина пути в кристалле у обеих компонент одинакова. Поэтому после выхода из кристалла они снова объединяются в пучок, поляризованный в первоначальном направлении.

Однако если между передней и задней поверхностями кристалла приложить напряжение U, то разность хода у расщепленных компонент составит величину $\varphi=\pi El/U$, где E — напряженность электрического поля, а l — толщина кристалла в направлении распространения света. Таким образом, произойдет поворот направления поляризации света.

Если далее на пути света поставить анализатор, пропускающий свет с линейной поляризацией, то на выходе такой системы свет окажется промодулированным по интенсивности в соответствии с углом поворота вектора поляризации в модуляторе (кристалле). При напряжении U_0, при котором угол поворота вектора поляриза-

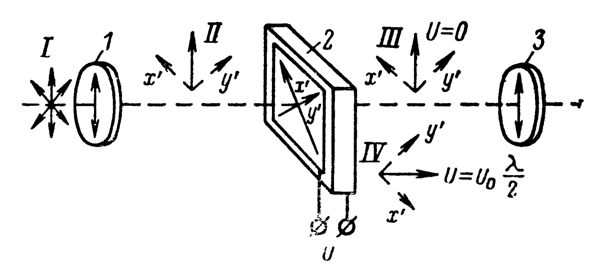


Рис. 25. Электрооптический модулятор.

1 — поляризатор; *2* — кристалл дигидрофосфата калия; *3* — анализатор; *I* — неполяризованный пучок света на входе модулятора; *II* — направление поляризации пучка после прохождения поляризатора и его проекции на направления кристаллографических осей кристалла; *III* — то же при $U=0$; *IV* — повернутое на 90° направление поляризации при $U=U_0$.

ции достигнет 90°, свет на выходе анализатора будет практически отсутствовать, т. е. будет получена 100%-ная модуляция.

С помощью некоторых кристаллов может быть получено отклонение светового пучка. Для получения дискретного отклонения на месте анализатора располагают двоякопреломляющий кристалл, например, кальцита. Известно, что одноосные кристаллы (кальцит и др.) обладают свойством смещения пучка света с одним направлением поляризации (необыкновенного пучка), в то время как пучок, поляризованный перпендикулярно направлению поляризации необыкновенного пучка (обыкновенный пучок), проходит через кристалл без смещения. При правильной ориентации кристалла кальцита угол между обыкновенным и необыкновенным пучками в кальците составляет 6°. Оба пучка выходят из кристалла параллельно падающему световому пучку, но смещенными относительно друг друга.

На рис. 26,*а* показана пара, состоящая из электрооптического (модулятора) и двоякопреломляющего кристаллов, соответствующим образом ориентированных относительно друг друга. При отсутствии управляющего сигнала поворота вектора поляризации пучка в модуляторе не происходит и на выходе кристалла кальцита появляется обыкновенный пучок. При подаче на вход x_i модулятора напряжения, обеспечивающего поворот вектора поляризации на 90°, на выходе появляется необыкновенный пучок (с направлением вектора поляризации вдоль оси x).

На рис. 26,*б* представлена система из трех пар кристаллов, позволяющая при соответствующих включениях модуляторов получить любое из восьми положений луча. Для равномерности шага между всеми восемью координатами каждый последующий кристалл кальцита должен быть в 2 раза тоньше предыдущего.

Ясно, что использование n пар кристаллов обеспечивает отклонение в любую из 2^n точек. Если применить две системы с n и m па-

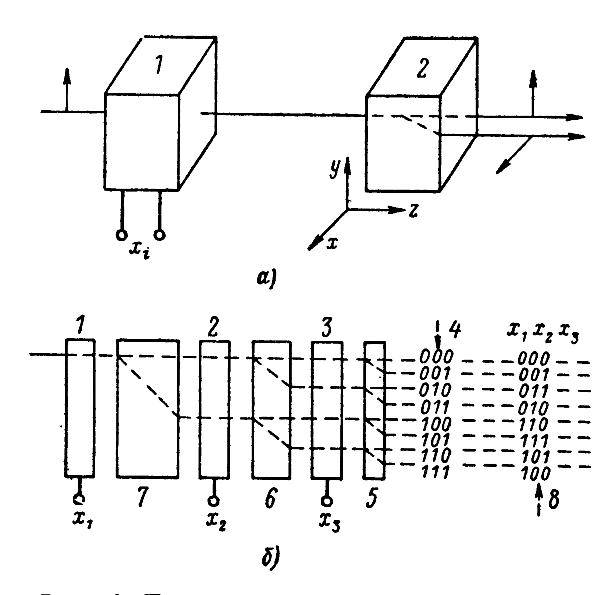


Рис. 26. Принцип построения дискретной отклоняющей системы.

а — система из электрооптического (*1*) и двоякопреломляющего (*2*) кристаллов; *б* — система на восемь положений (*1*, *2*, *3* — модуляторы, на входы которых подаются двоичные сигналы x_1, x_2, x_3 соответственно, *4* — ряды цифр, представляющие двоичный код одного из восьми положений пучка на выходе системы; ***5***, ***6***, *7* — кристаллы кальцита, толщины которых относятся как 1 : 2 : 4; *8* — ряды цифр, соответствующие двоичному коду на входах x_1, x_2, x).

рами кристаллов с отклонением в двух взаимно перпендикулярных направлениях, то получится система плоского координатного выбора с $2^n \cdot 2^m$ точками. Такая система может найти применение, например, при построении оптических запоминающих устройств. Для отклонения в 1 000 позиций при допустимой мощности рассеяния 5 *вт* можно легко достичь быстродействия системы в 2 *Мгц*.

Самым простым устройством для непрерывного отклонения светового пучка является электрооптическая призма. Если призма сделана из материала, в котором наблюдается эффект Керра, то угловое отклонение пучка будет пропорционально квадрату приложенного к электродам призмы напряжения.

Помимо кристаллов дигидрофосфата калия, известны и другие материалы, обладающие электрооптическими свойствами, такие, например, как кристаллы первичного кислого фосфата аммония, хлористой меди, цинковой обманки, смешанный твердый раствор танталата и ниобата калия. Последний из материалов обладает квадратичным эффектом Керра. Заметим, что у названных электрооптических материалов спектральные области пропускания лежат в области спектра от 0,25 до 20 *мк*. Спектральная область пропускания кристаллов дигидрофосфата калия, получивших наибольшее применение, перекрывает участок от 0,25 до 1,7 *мк*. Следует, однако, отметить такие недостатки кристаллов фосфата аммония и дигидрофосфата калия, как хрупкость, повышенная гигроскопичность и необходимость приложения к модулятору на их основе относительно высоких напряжений.

В заключение заметим, что световые пучки также можно отклонять механическим, электромеханическим, электроакустическим методами. Но эти методы в чистом виде либо не имеют преимуществ перед электрооптическими способами отклонения светового пучка, либо еще недостаточно разработаны, как, например, электроакустический метод.

Глава вторая

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ И УСТРОЙСТВА

5. ОПТИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

С помощью оптической связи можно создавать оптико-электронные четырехполюсники, в которых входное и выходное напряжения электрически разделены. Вход и выход такого четырехполюсника электрически развязаны между собой. Сопротивление между источником света и приемником лучистой энергии может превосходить 10^{16} *ом* при ничтожной емкости между ними, например, составляющей лишь 0,0001 *пф*. Такая практически полная электрическая изоляция возможна лишь в устройствах с фотонной связью, заменяющей электрические соединения в схемах.

Оптические сигналы отличаются от электрических прежде всего тем, что носителями их являются фотоны, которые электрически нейтральны в отличие от носителей электрических сигналов — электронов, имеющих отрицательный заряд. Оптическое излучение состоит из двухмерных волн и поглощается многими распространенными материалами. Излучение можно заметить глазом или каким-либо соответствующим прибором. В оптико-электронных схемах отсутствуют электростатические потенциалы, поэтому в них не происходит накопление заряда. Наличие электрической развязки и изоляции позволяет отдельные узлы многокаскадной схемы конструировать и отлаживать независимо от других.

Оптическая (фотонная) связь позволяет успешно решить одну

из наиболее трудных задач микроэлектроники — проблему передачи сигналов между отдельными конструктивными платами. Надежность и габариты микроэлектронных устройств вычислительной техники в первую очередь определяются качеством электрических соединений. Установлено, что надежность работы твердотельного устройства, собранного на одной пластине, в 10 раз выше надежности того же устройства, собранного из отдельных элементов с электрическими связями между ними. Применение оптической связи для передачи сигналов между соседними пластинами, на которых сформировано большое число отдельных микросхем, позволяет собрать их в плотный пакет, значительно облегчить и упростить сборку, уменьшить объем устройств в целом. Кроме того, устранение паяных соединений и их замена на оптическую связь в таком пакете значительно повышает надежность устройства.

Оптико-электронные схемы с излучателями, работающими в видимой области спектра, дают возможность визуально судить о состоянии схемы, что облегчает работу оператора при наладке, монтаже и эксплуатации вычислительных устройств и приборов.

Важнейшей особенностью оптической связи в схемах, как уже говорилось, является отсутствие обратного потока информации (обратного воздействия приемника света на его источник). Эта особенность обеспечивает отсутствие влияния нагрузки на работу схемы, исключает нежелательную обратную связь и повышает помехоустойчивость. Так как вход и выход устройств с оптической связью разделены, то, используя обратную связь и оптико-электронные усилители, можно получать большое число схемных разновидностей. Например, на оптико-электронных логических элементах осуществимы такие логические схемы, в которых число входов и выходов может достигать нескольких сотен и даже тысяч. Ни один из обычных электронных приборов, используемых в настоящее время, не обладает такой нагрузочной способностью ни на входе, ни на выходе.

Двумерная природа оптического излучения позволяет многим сигналам независимо и параллельно распространяться по простым каналам без взаимного их влияния. Отличительной особенностью оптического тракта передачи информации является то, что он с успехом может заменить импульсный трансформатор, также обеспечивающий электрическую развязку по постоянному току, и при этом передавать еще и постоянную составляющую сигнала.

В больших системах из-за общих заземленных шин и шин питания возникают значительные токи, вызванные множеством электрических соединений между отдельными частями системы. Введение оптической связи между этими частями системы обеспечивает полную развязку по питанию, исключает циркуляцию токов в заземленных шинах, а значит, и заметное падение напряжения. Высокая степень независимости действия отдельных оптико-электронных схем в системе исключает положение, при котором выход из строя одной из таких схем влияет на работу других частей системы. Величина наводок в соседних оптических каналах практически не зависит от ширины спектра передаваемых сигналов.

Сложной задачей проектирования электронных вычислительных машин с высокой тактовой частотой (порядка 10 *Мгц* и выше) является способ передачи сигналов между устройствами. Для уменьшения реактивного сопротивления линии передачи и устранения взаимных наводок применяются коаксиальные кабели и поло-

сковые линии. Однако согласование волновых сопротивлений с целью устранения отраженных сигналов в этих цепях вызывает значительные трудности. Кроме того, затухание импульсов в коаксиальных кабелях и полосковых линиях значительно возрастает с повышением частоты передаваемых сигналов. Например, для коаксиального кабеля марки РК-19 при повышении частоты сигнала от 10 до 300 *Мгц* затухание возрастает почти в 6 раз. Передача же высокочастотных оптических сигналов по стекловолокну не сопровождается увеличением затухания с повышением частоты, а само затухание и габариты волоконных световодов не уступают характеристикам лучших коаксиальных кабелей. Так, например, затухание типичного пассивного волокна составляет 1,1 *дб/м*, а у одного специально изготовленного коаксиального кабеля диаметром 0,89 *мм* затухание на частоте 1 *Ггц* составляло 1,8 *дб/м*.

Возможность модуляции оптического пучка путем простой установки на его пути механических или светочувствительных фотохромных шаблонов (масок) позволяет реализовывать различные логические функции на базе использования оптико-электронных логических матриц (преобразователей). Смена самих функций при этом может осуществляться с высокими скоростями.

Следует, однако, отметить и недостатки, присущие оптико-электронным элементам связи. К ним надо отнести прежде всего низкий коэффициент передачи и преобразования энергии, а также необходимость защиты элементов от возможной паразитной перекрестной засветки. Кроме того, в настоящее время оптико-электронные элементы связи не могут еще обеспечить достаточно высокого коэффициента качества (произведение коэффициента усиления на диапазон рабочих частот). Необходимо также отметить, что быстродействие выпускаемых промышленностью приемников света пока еще недостаточно велико. Тем не менее применение простой логики и преимущества оптико-электронных схем с излишком компенсируют все указанные недостатки.

6. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ ЯЧЕЙКА

Основой любого оптико-электронного устройства или схемы служит оптико-электронная ячейка, которая осуществляет преобразование электрических сигналов в оптические, передачу этих сигналов по оптическому каналу связи (световоду) и последующее обратное преобразование оптического сигнала в электрический (с усилением в случае необходимости). Такая ячейка состоит из излучателя световой энергии (источника света), светопроводящей среды (световода) и фотоприемника (приемника света). По типу используемых приборов оптико-электронные ячейки делятся на ячейки с некогерентным и когерентным излучением.

В оптико-электронных ячейках с некогерентным излучением через излучатель и фотоприемник по подводящим сигналы проводникам и самому материалу излучателя и фотоприемника перемещаются электрические заряды. Между излучателем и фотоприемником передача энергии осуществляется с помощью фотонов, электрически нейтральных. Такие устройства из-за наличия в них реактивных элементов инерционны.

Оптико-электронные ячейки с когерентным излучением более быстродействующие. Объясняется это тем, что в когерентных ячейках обычно отсутствуют фотоприемники, а сигналы воспринимаются

и усиливаются лазерным приемником когерентного излучения. Фотоприемники с электрическим выходным сигналом в этом случае необходимы лишь на выходе таких ячеек. В отличие от некогерентных ячеек, в которых электрические сигналы сначала преобразуются в световые, а затем снова в электрические, в когерентных ячейках происходит преобразование световых сигналов в световые. Процесс преобразования световых сигналов в световые требует лишь изменения внутриатомных энергетических состояний, и времени на подобного рода преобразования требуется меньше, чем на передачу электрических сигналов по проводам в ячейках с некогерентным излучением.

Следует, однако, обратить внимание на такое преимущество ячеек с некогерентным излучением, как наличие направленности в распространении информационного или управляющего сигнала. В ячейках же с когерентным излучением необходимо использовать специально направленные линии связи или располагать входные и выходные пути распространения оптического сигнала под прямым углом, так как иначе эти пути могут оказаться неразвязанными, и сигналы будут накладываться один на другой.

Логические оптико-электронные ячейки с некогерентным излучением можно разделить на ячейки с низким быстродействием, работающие на поликристаллических приборах, и на ячейки с высоким быстродействием, использующие монокристаллические быстродействующие полупроводниковые приборы. Передача сигналов между каскадами ячейки может осуществляться оптическим или электрическим способами.

Первый способ построения логических схем предусматривает локализацию тракта передачи оптического сигнала. В этом случае информация передается между каскадами в виде электрических сигналов по электрическому тракту. При этом используют электролюминесцентные источники и приемники излучения на фоторезисторах. По второму способу построения логических схем локализации подвергается электрический тракт передачи информации, а передача сигналов между каскадами оптико-электронной ячейки осуществляется с помощью оптического тракта связи.

Построение каскадов в соответствии с первым способом обеспечивает высокоэффективную оптическую связь, однако такой вариант не исключает некоторых недостатков связи между каскадами, встречающихся в обычных электронных вычислительных машинах. К ним относятся отражение сигналов, перекрестные наводки, наличие задержки в распространении сигнала, влияние паразитных реактивностей цепи, а также ограниченность значения коэффициентов объединения по входу и разветвления по выходу.

Варианту построения каскадов по второму способу свойственны относительная простота передачи сигналов между каскадами, а также большое значение коэффициентов объединения по входу и разветвления по выходу. Этот вариант каскадирования наиболее эффективен в случае небольших расстояний между каскадами (связь между ячейками на одной плате или связь между ячейками, расположенными на соседних платах в одном пакете). Недостаток этого способа построения многокаскадных оптико-электронных ячеек заключается в трудности осуществления эффективной оптической связи между каскадами, расположенными относительно далеко один от другого (например, связь между каскадами, расположенными в разных блоках вычислительной машины).

7. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ РАЗВЯЗКИ

Одним из первых оптико-электронных устройств, реализующих возможности оптической связи, был развязывающий прибор с фотонной связью. Такой прибор состоит из арсенид-галлиевого источника света и оптически связанного с ним кремниевого фотодиода.

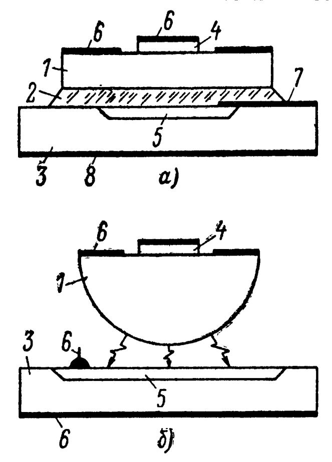


Рис. 27. Устройство оптико-электронных развязывающих приборов с плоским (*а*) и полусферическим (*б*) источниками света.

1—арсенид-галлиевый источник света (материал *n*-типа); *2* — селеновое стекло; *3* — кремний *n*-типа: *4* — диффузионная мезаструктура *p*-типа; *5* — планарная структура *p*-типа; *6* — электрические контакты; *7* — расширенный контакт к области *p*-типа; *8* — контакт к области *n*-типа.

Конструктивно развязывающие приборы могут быть выполнены либо с плоским (рис. 27,*а*), либо с полусферическим (рис. 27,*б*) источником света. Приборы с полусферическим источником света имеют более высокий квантовый выход и поэтому применяются преимущественно в тех случаях, когда нельзя использовать среду с высоким показателем преломления. Приборы с плоским источником меньше по габаритам и больше подходят для применения их в интегральных схемах.

При передаче сигналов от полусферического источника света к фотодиоду используется воздушная среда и просветляющее покрытие источника уменьшающее отражение на поверхности раздела полупроводник — воздух. Для приборов с плоским источником света перспективной связующей средой оказываются свинцовые стекла и стекла на основе селена с показателями преломления 1,8—1,9 и 2,4—2,6 соответственно. Применение такой среды связи увеличивает выходное излучение благодаря уменьшению отражения на поверхности раздела и увеличению предельного угла. Связующая среда с высоким показателем преломления уменьшает и отражение на поверхности раздела около кремниевого фотодиода. У приборов с плоским источником света полный квантовый выход достигает 0,37% при токе через источник 10 *ма*.

Конструктивно развязывающее устройство с фотонной связью оформляется в стандартном корпусе с четырьмя электрическими выводами. Вход и выход в таком приборе электрически изолированы. Паразитная связь между входом и выходом практически полностью исключается благодаря введению специального прозрачного электропроводящего экрана, снижающего емкость связи до 0,0005 *пф* и меньше. Один из таких приборов, разработанных в США, рассчитан на предельную частоту 60 *Мгц* и сопротивление нагрузки 20 *ком*. Напряжение сигнала на выходе составляет 20 *мв*. При этом ток через излучатель (источник света) не превышает 10—20 *ма*.

В качестве фотоприемника в развязывающем устройстве могут быть использованы управляемые светом переключатели со структу-

рой типа *p-n-p-n*. При токе через излучатель порядка 10 *ма* они позволяют включать токи через выходные зажимы прибора до 5 *а*. Время срабатывания их меньше 10 *мксек*. Такое развязывающее устройство выполняет функции реле с удержанием (самоблокировкой).

В США выпускаются серийно оптико-электронные четырехполюсные переключатели, в которых объединены полусферический источник света (арсенид-галлиевый диод) и кремниевый фотодиод с симметричной характеристикой проводимости. Зазор между источником света и фотодиодом в таком приборе составляет несколько десятков микрон. Прибор выдерживает без пробоя разность потенциалов 400 *в*. Его вольт-амперные характеристики имеют симметричную форму и аналогичны характеристикам обычного переключательного транзистора с двумя эмиттерами. Для нормальной работы переключателя необходимо подавать на излучающий диод (источник света) напряжение около 1,3 *в*, при этом через него протекает ток около 100 *ма*. Время переключения составляет 3 *мксек* и время спада 20—40 *мксек*.

Универсальным прибором, который может быть использован для осуществления логических функций (при условии, что его коэффициент усиления по току равен или больше единицы), является развязывающее устройство с кремниевым фототранзистором в качестве приемника света. Комбинируя этот прибор с соответствующими источниками питания и тактовых импульсов, можно осуществить все основные логические операции и операции, связанные с запоминанием в цифровых вычислительных машинах. Однако применение такого типа приборов ограничивается в настоящее время их недостаточным быстродействием. Так, например, при сопротивлении нагрузки 10 *ом* время нарастания у такого прибора составляет 1,5 *мксек*, а время задержки 1,6 *мксек*.

Одним из вариантов развязывающего устройства является разработанный за рубежом прибор с фотонной связью, на выходе которого установлен люминесцентный арсенид-галлиевый диод, излучающий свет, примерно пропорциональный по своей интенсивности току, протекающему через диод. Излучение передается на вход фотоприемника при помощи пучка специальной волоконной оптики с когерентной передачей изображения. В качестве фотоприемника может быть использован фотодиод со структурой типа *p-i-n* или фототранзистор. Такой прибор является комбинированным, поскольку он может быть составлен из отдельно выполненных излучателя с волоконным световодом и одного из указанных фотоприемников, также имеющих световоды. Излучатель работает с квантовой эффективностью не менее 0,1%. Ток диода составляет 2—30 *ма*, прямое сопротивление не более 2 *ом*, напряжение пробоя не менее 5 *в*, паразитная емкость (при нулевом смещении) 120 *пф*. Используемый в качестве приемника света фотодиод можно считать достаточно быстродействующим. Его время срабатывания не более 0,2 *нсек*, паразитная емкость (при обратном напряжении 20 *в*) около 1 *пф*, напряжение пробоя не менее 80 *в*, обратный ток утечки не более 0,002 *мка*. Фототранзистор, используемый в качестве приемника света, имеет время срабатывания не более 2 *мксек*, емкость коллектор — база составляет 9 *пф*. Суммарный коэффициент передачи всего устройства при разомкнутой базовой цепи близок к единице. Это достигается применением кремниевого фототранзистора с высоким коэффициентом усиления по току.

8. СХЕМЫ С ПРИБОРАМИ РАЗВЯЗКИ

Фотонные развязывающие приборы находят применение в простых усилителях, которые электрически развязаны от остальной части схемы, в линейных усилителях, работающих с малыми сигналами, и в других устройствах.

Простой усилитель с электрической развязкой. Схема такого усилителя и его типичная переходная характеристика (выходной сигнал) приведены на рис. 28. Усилитель обеспечивает передачу и усиление сигналов при электрической развязке между входом и выходом схемы в диапазоне от постоянного тока до предельной частоты усиления прибора. Он может применяться в данном частотном диапазоне при связи схем, потенциалы которых значительно различаются. Примером применения такого усилителя может служить дистанционная выборка токового сигнала в существующих диодных схемах, где один из обычных схемных диодов заменен на арсенид-галлиевый диод. Использование оптического фототранзисторного усилителя позволяет выполнять такие функции, как запуск, смещение уровня сигнала постоянного тока и связь в транзисторных схемах.

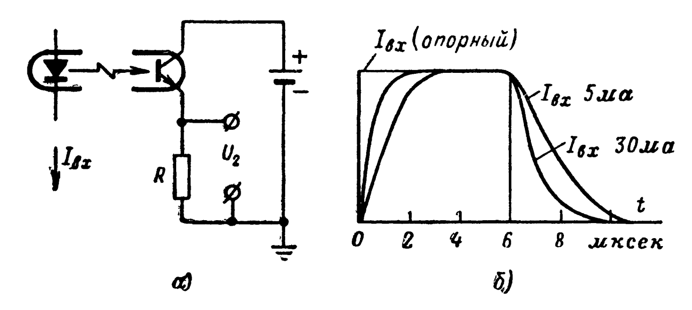
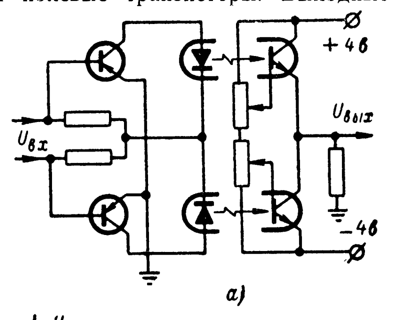


Рис. 28. Простой усилитель с электрической развязкой.
а — схема усилителя; *б* — типичная переходная характеристика (относительная реакция на импульс U_2 при $R=100$ *ом*).

Усилитель может с успехом заменить импульсные трансформаторы, особенно там, где важно обеспечить восстановление или передачу постоянной составляющей импульсного сигнала. Применение оптического усилителя с развязкой позволяет исключить замкнутые контуры в больших схемах, образующиеся из-за цепей заземления. Это достигается благодаря устранению множества соединительных цепей между отдельными частями схемы. Использование оптических каналов связи вместо электрических позволяет также исключить циркуляцию значительных индуцированных токов и заметное активное падение напряжения. Фотонные оптические усилители обеспечивают электрическую развязку отдельных узлов в большой системе, исключая такое положение, при котором отказ или сбой в одном из них влияет на работу других.

Линейный усилитель слабых сигналов. Схема линейного усилителя с непосредственными связями (с электрически изолированными входами) и его частотная характеристика показаны на рис. 29. Усилитель работает с модулированной несущей частотой и обеспечи-

вает подавление синфазных помех на 230 *дб*. Кроме того, он обладает повышенной помехоустойчивостью в отношении внешних наводок. Сигнал с выхода дифференциального транзисторного каскада с незаземленным входом поступает на вход оптического усилителя. Для достижения высокого входного сопротивления во входном каскаде могут быть использованы полевые транзисторы. Выходные фототранзисторы электрически смещены в обратном, а оптически в прямом направлении. Это позволяет получить улучшенные результирующие эквивалентные входные шумовые характеристики.



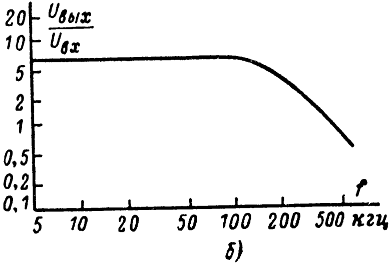


Рис. 29. Линейный усилитель слабых сигналов.

а — схема усилителя; б—частотная характеристика.

Подобные дифференциальные усилители могут использоваться как электрически развязанные токовые зонды, выходные усилители мостовых схем, дифференциальные и одноканальные элементы связи, усилители для термопар или датчиков других типов, развязывающие устройства сигнальной цепи с заземленным контуром, усилители сигнала отклонения от нуля с незаземленным входом.

Триггерные схемы. Возможность использования оптического возбуждения триггера, выполненного в виде микросхемы, была продемонстрирована одной из зарубежных фирм. В этом устройстве (рис. 30) используются четыре транзистора специальной конструкции, позволяющей уменьшить в интегральной схеме паразитную емкость и напряжение насыщения на переходе коллектор — эмиттер.

Такая схема по сравнению с ее аналогом, выполненным обычным методом, работает значительно лучше. Несмотря на низкую эффективность передачи света, обусловленную плохим согласованием коэффициентов преломления материалов и отсутствием специально рассчитанных на оптическую связь микросхем, оптический запуск действовал успешно. Источник световых сигналов (диод из арсенид-галлия) при помощи эпоксидного клея присоединен к световоду из трисульфида мышьяка. Световод диаметром 0,3 и длиной 12 *мм*, в свою очередь, приклеен поверх двух транзисторов с одной из сторон микросхемы.

Как известно, изменение величины нагрузки приводит к ухудшению рабочих характеристик многих схем. Для исключения влияния нагрузки на параметры схемы и обеспечения полной электрической развязки можно воспользоваться усилителем с фотонной связью. На рис. 31 приведена схема обычного триггера, у которого последовательно с коллекторными резисторами включены арсенид-

галлиевые фотодиоды, связанные с соответствующими фототранзисторами. Поскольку выход устройства не связан электрически с триггером, изменение выходной нагрузки не оказывает никакого влияния на работу схемы.

На рис. 32 приведены шесть вариантов симметричной триггерной схемы с внутренней фотонной связью. Такое разнообразие переключательных схем стало возможным только благодаря применению оптико-электронных развязывающих приборов.

Высоковольтный стабилизированный источник питания. Многие системы для поддержания их в определенном состоянии требуют подачи в цепь обратной связи сигнала рассогласования (ошибки).

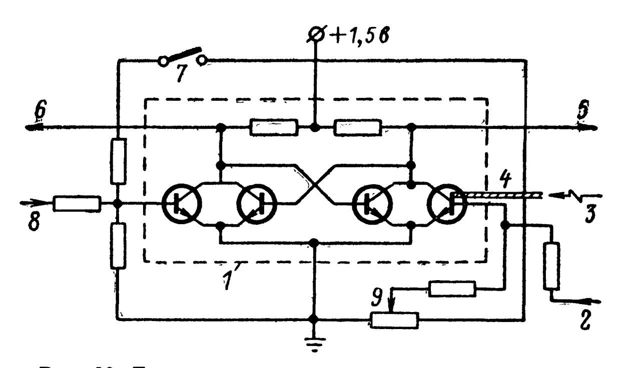


Рис. 30. Триггер в виде микросхемы с оптическим управлением посредством световода от диода на арсениде галлия, находящегося в другой схеме.

1 — микросхема триггера; *2* — вход электрический; *3* — вход оптический; *4* — световод; *5* и *6* — выходы; *7* и *8* — установка нуля; *9* — регулятор смещения.

Таким сигналом может быть сигнал рассогласования между напряжением в схеме и напряжением опорного образцового источника. Этот метод находит широкое применение в высоковольтных стабилизированных источниках питания. Опорным источником в них служит полупроводниковый диод, смещенный в обратном направлении. Из-за ограниченного диапазона образцовых опорных источников нельзя осуществлять непосредственное дифференциальное сравнение. В этом случае может быть использован фотодиод из арсенид-галлия, смещенный слегка в прямом направлении и оптически связанный с фототранзистором (рис. 33).

Стабилизатор с фотонной обратной связью работает следующим образом. Изменение стабилизируемого напряжения приводит к изменению прямого тока через фотодиод. Последний благодаря наличию оптической связи воздействует на фототранзистор, который, в свою очередь, действуя как двухэлектродный управляемый источник тока, компенсирует первоначальное отклонение.

Оптический усилитель очень чувствителен к изменению входного напряжения. В случае необходимости усиление в цепи обратной связи может быть увеличено. Применение дополнительного (вспомогательного) оптического усилителя (штриховая часть схемы на рис. 33) может быть использовано для индикации тока нагрузки

и для его ручной регулировки, а также для защиты от перегрузки.

Модуляторы пучка для электроннолучевых трубок. Для работы электроннолучевых трубок обычно необходимо ускоряющее напряжение порядка нескольких киловольт. Отклоняющее напряжение удобно подавать на пластины при потенциале, близком к потенциалу заземления. При этом катод и модулятор трубки оказываются под отрицательным потенциалом в несколько киловольт по отношению к потенциалу заземления. Небольшой сигнал в этом случае, прикладываемый между модулятором и катодом трубки, трудно передать от другой схемы, управляющей яркостью электронного пучка. Эта задача чаще всего решается путем введения двойного высоко-

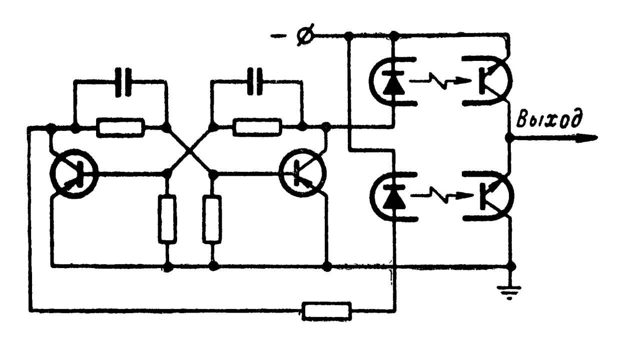


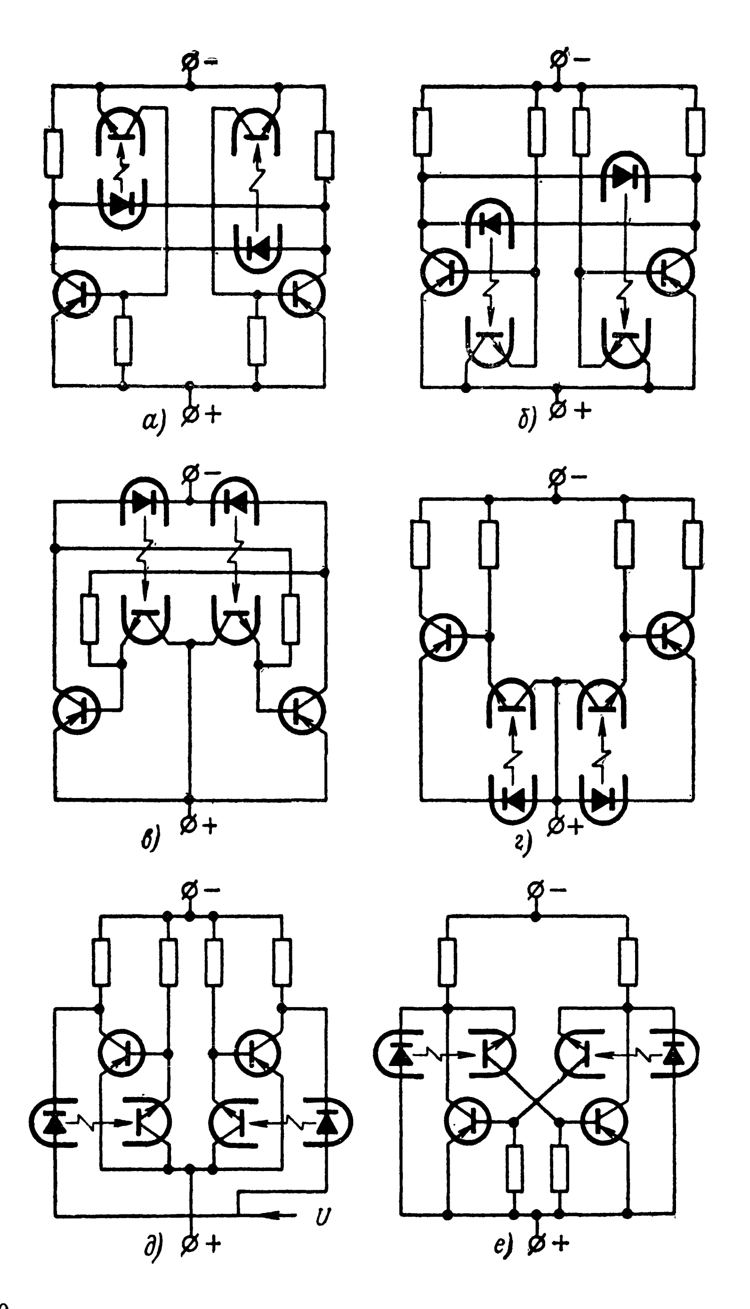
Рис. 31. Схема обычного триггера, у которого последовательно с коллекторными сопротивлениями включены арсенид-галлиевые диоды.

вольтного источника питания (один источник для модуляторной, а другой для катодной цепи) и приложения управляющего сигнала в точке, где один из источников заземляется. Дополнительная емкостная нагрузка из-за высоковольтного трансформатора и выпрямителя ограничивают ширину полосы, в пределах которой возможна модуляция яркости электронного пучка. Кроме того, небольшие отклонения напряжений источников питания проявляются в форме значительных колебаний яркости пучка.

На рис. 34 приведена схема модуляции с использованием оптического развязывающего усилителя, устраняющего все указанные недостатки.

Задающие генераторы и генераторы сигналов. Известно, что изменение нагрузки сказывается на работе и характеристиках многих устройств, так как при этом меняются амплитуда и частотные характеристики сигналов. Особенно это сказывается на работе таких устройств, как разветвители сигналов, устройства с большим коэффициентом разветвления по выходу, логические устройства вычислительных машин и др.

Для снижения влияния нагрузки на работу кварцевого генератора, например, применяют развязывающие сопротивления. Однако введение дополнительных сопротивлений в цепь нагрузки уменьшает полезную выходную мощность, снижает отношение сигнал/шум, ухудшает частотную характеристику генератора. Чтобы исключить влияние нагрузки, можно использовать в схеме генератора оптико-



а)
б)
в)
г)
д)
е)
U

электронный развязывающий усилитель (рис. 35). Излучающий диод в этой схеме, включенный в регенеративный контур кварцевого генератора, ведет себя как обычный пассивный элемент, и изменение нагрузки не будет сказываться на работе генератора, так как связь между ним и нагрузкой осуществляется фотонным способом. Ток смещения задающего генератора может использоваться для кон-

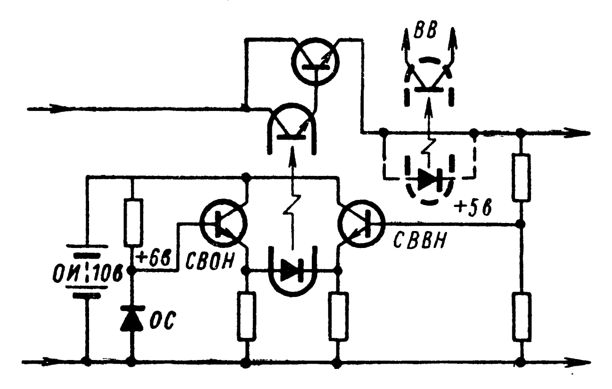


Рис. 33. Схема высоковольтного стабилизированного источника питания с оптико-электронным развязывающим усилителем.

ОИ — опорный источник; *ОС* — опорный стабилитрон; *СВОН* — сигнал выборки опорного напряжения; *СВВН* — сигнал выборки выходного напряжения; *ВВ* — вспомогательный выход.

троля автоматической температурной компенсации и регулирования температуры.

Синхронные демодуляторы и детекторы. В том случае, когда имеется возможность использовать опорный сигнал от источника, можно, применяя оптико-электронные усилители, создать схему фазочувствительного детектора. Такая схема приведена на рис. 36. Здесь от источника сигналов на вход четырехполюсника подается опорный, изменяемый по частоте сигнал синусоидальной или прямоугольной формы. Одновременно тот же сигнал с выхода источника сигналов поступает через фазосдвигающую цепь на фотодиод. Фототранзистор выпрямляет выходной сигнал, и таким образом формируется сигнал постоянного тока, пропорциональный величине сигнала с выхода четырехполюсника.

Рис. 32. Варианты симметричной триггерной схемы с фотонной связью.

а — фотодиод включен между коллекторами, а фототранзистор последовательно с базой; *б* — фотодиод включен между коллекторами, а фототранзистор параллельно с базой; *в* — фотодиод включен последовательно с коллектором, а фототранзистор параллельно с базой; *г* — фотодиод включен последовательно с эмиттером, а фототранзистор параллельно с базой; *д* — фотодиод включен между шиной напряжения фиксации *U* и коллектором, а фототранзистор параллельно с базой; *е* — фотодиод включен параллельно с коллектором, а фототранзистор цепь коллектор — база.

Путем увеличения значений C и R эффективная полоса пропускания детектора может быть сделана достаточно узкой. При таком варианте построения детектора исключаются трудности, обусловленные необходимостью слежения за частотой источника сигналов при помощи узкополосных фильтров. Мощность шумов системы снижается пропорционально ширине полосы. Фаза и амплитуда мо-

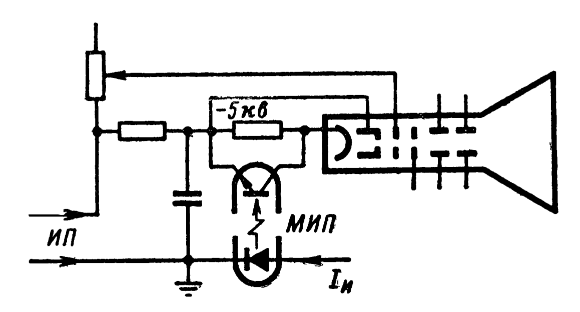


Рис. 34. Схема модуляции яркости электронного пучка с оптико-электронным развязывающим усилителем.

ИП — источник питания (высоковольтный выпрямитель); *МИП* — модулятор интенсивности пучка; $I_и$ — ток интенсивности пучка.

гут быть определены по максимальному значению напряжения U для каждой частоты посредством фазосдвигающей цепи.

Модуляторы, смесители, переключатели, фиксаторы положения. Последовательно и параллельно включенные фототранзисторы могут быть использованы в качестве аттенюаторов (ослабителей), рассчитанных на включение их в коаксиальную линию. Их можно применять так же, как универсальные электронные потенциометры, как быстродействующие системы автоматического регулирования усиления и автоматического контроля уровня, как маломощные прерыватели для преобразователя постоянного тока в переменный (или переключатели уровня постоянного тока), как устройства для введения помех или шумов в тракт связи при исследовании помехозащищенности системы и как смесители сигналов. Арсенид-галлиевые фотодиоды при этом могут выполнять функции детекторов огибающей или собственно смесителей для входных сигналов метрового диапазона. Оптико-электронные усилители в целом позволяют сконструи-

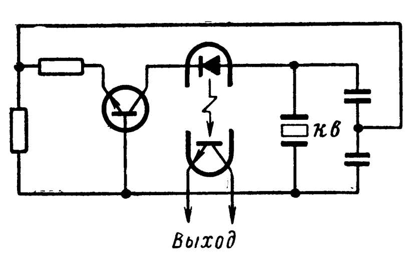


Рис. 35. Схема кварцевого генератора с оптико-электронным развязывающим усилителем.

ровать объединяющие или разветвляющие устройства, в которых можно объединить много входов, а суммарный сигнал направить по одному каналу и, наоборот, с выхода одного канала сигналы можно подавать сразу на несколько управляемых фототранзисторов.

В случае раздельного выполнения излучающего фотодиода и фототранзистора, образующих оптико-электронный усилитель, можно создать индикатор механических перемещений. Такой оптико-электронный фиксатор положения способен сигнализировать о моменте механического соединения или разъединения деталей при их

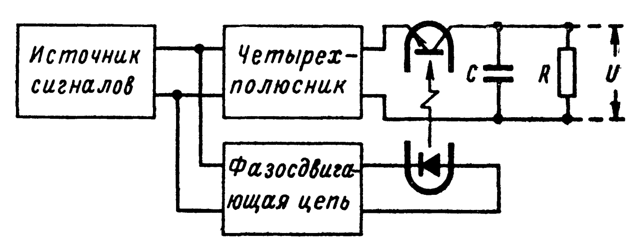


Рис. 36. Схема фазочувствительного детектора с оптико-электронным развязывающим усилителем.

относительном перемещении. Оптико-электронные фиксаторы положения отличаются высоким быстродействием и пригодны для различных видов связи.

Быстродействующие реле. В настоящее время оптико-электронные приборы успешно заменяют целый ряд широко распространенных в технике электромеханических реле. По компактности, быстродействию, помехоустойчивости и надежности они значительно превосходят своих электромеханических предшественников. На рис. 37 показана схема оптико-электронного эквивалента двухполюсного реле на одно направление.

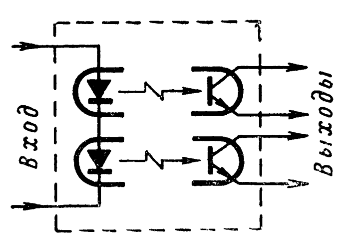


Рис. 37. Схема оптико-электронного эквивалента двухполюсного реле на одно направление.

Большое преимущество оптико-электронных реле перед электромеханическими заключается в отсутствии у первых подвижных контактов. Благодаря этому скорость реакции на переключение доходит у них до 100 *Мгц* (у электромеханических реле до 1 *кгц*). Емкость между входом и выходом у оптико-электронных реле составляет примерно 0,01 *пф* (у электромеханических реле 2 *пф*), а напряжение между ними практически не ограничено (у электромеханических реле предельное напряжение между входом и выходом составляет 1—10 *кв*). Оптико-электронные реле, кроме того, очень легко экранировать от внешних воздействий, между тем как экранировка излучаемых магнитных полей у электромеханических реле довольно затруднительна.

Следует, конечно, отметить и сравнительные недостатки оптико-электронных реле. Если, например, ток через выходные контакты у электромеханических реле может составлять много ампер, то оптико-электронные реле способны переключать токи не более 100 *ма*. Напряжение между разомкнутыми контактами у электромеханического реле может доходить до 2 *кв*, и сопротивление замкнутого контакта составляет миллиомы, а у электронно-оптических реле эти величины соответственно равны 50 *в* и 100 *ом*.

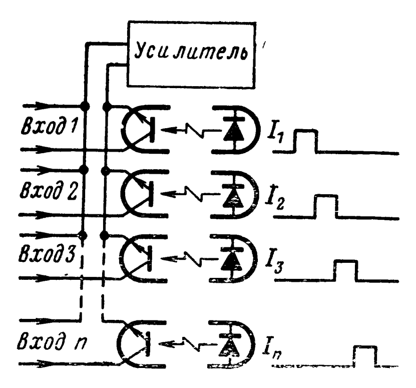


Рис. 38. Схема оптико-электронного уплотняющего устройства, последовательно подключающего *n* входных каналов на вход одноканального уплотняющего усилителя, электрически развязанного со входными цепями.

Уплотняющие устройства. В многоканальных переключателях систем обработки информации широко применяется коммутация сигналов, поступающих последовательно от группы датчиков. Для этих систем важным является разделение коммутирующих цепей от шин, по которым распространяются информационные сигналы. Такая развязка в многократной схеме необходима потому, что оба зажима любого из переключателей находятся под сигнальными потенциалами.

Как правило, многоканальный переключатель состоит из транзисторного прерывателя с трансформаторным управлением, обеспечивающим развязку по постоянному току. Такое многоканальное устройство вместе с трансформатором может быть заменено оптико-электронным коммутатором, состоящим из фотодиодов и фототранзисторов. В отсутствие светового сигнала этот коммутатор имеет высокое сопротивление, в момент же подачи сигнала сопротивление переключателя резко уменьшается. В США подобного рода коммутаторы нашли применение в телеметрических системах для спутников и ракет, при контроле сотен различных параметров, а также при анализе экспериментальных результатов испытаний.

Схема оптико-электронного уплотняющего устройства, позволяющего коммутировать последовательно *n* входных параллельных информационных шин на вход одноканального усилителя, показана на рис. 38. В случае необходимости на выходе одноканального звена передачи информации может быть помещен синхронный оптико-электронный дешифратор, производящий обратную операцию, т. е. последовательное разделение информации по *n* соответствующим параллельным каналам. При этом один из входов такого уплотняющего устройства может быть замкнутым накоротко, а другой подключен к источнику опорного напряжения для получения *n*-канального усиления со стабилизацией нулевого уровня и усиления с помощью прерывателя. Быстродействие оптико-электронных переключателей сравнимо с аналогичными транзисторными переключателями с трансформаторными входами.

9. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Как уже говорилось, возможность получения хорошей электрической развязки при помощи фотонной связи позволяет исключить фон и паразитные сигналы, обусловленные общими цепями питания. Проблема избавления от паразитных сигналов особенно сложна в системах обработки информации, построенных на интегральных схемах, так как применение обычно используемых для развязки по постоянному току трансформаторов и конденсаторов оказывается слишком громоздким. В таких системах в большинстве случаев наилучшим способом избавления от паразитных сигналов при соединении схем является применение оптико-электронной связи. Устройство, которое может быть использовано для создания оптико-электронной связи в интегральных схемах, получило название оптико-электронного импульсного усилителя.

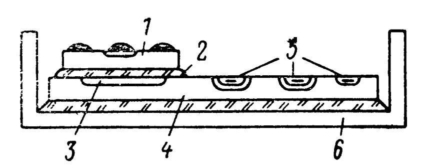


Рис. 39. Устройство (поперечный разрез) оптико-электронной интегральной схемы.

1 — диод-излучатель из арсенида галлия; *2* — селеновое стекло; *3* — кремниевый диффузионный фотодиод; *4* — кремниевая пластина с проводимостью *p*-типа; *5* — транзисторы, резисторы и конденсаторы; *6* — корпус.

Выпускаемый одной из американских фирм, такой усилитель представляет собой интегральную твердую схему, состоящую из кремниевого фотодиода, который изготовлен в одном монокристалле кремния вместе с другими элементами интегральной схемы, и плоского излучательного диода из арсенида галлия, установленного над светочувствительной поверхностью кремниевого фотодиода. Излучательный диод из арсенид-галлия работает при токе 5 *ма* и напряжении 1,2 *в*. При этом он излучает мощность около 30 *мквт*. Длина волны излучения соответствует близкой инфракрасной части спектра и равна приблизительно 0,9 *мк*. Усилитель развивает на выходе импульс с амплитудой коло 5 *в* при номинальном напряжении питания от источника напряжением 6 *в*.

На рис. 39 показано устройство интегральной схемы усилителя. Арсенид-галлиевый излучатель прикреплен к поверхности кремниевого фотодиода через слой селенового оптического стекла с коэффициентом преломления 2,9 и высокой степенью прозрачности для длины волны, излучаемой арсенид-галлиевым источником света (эффективность этого стекла в 23 раза выше, чем эффективность связи через воздух). Размеры усилителя таковы, что он может быть помещен в стандартный плоский корпус размерами $3\times6{,}5\times0{,}8$ *мм*.

Для уменьшения емкости между излучательным диодом и кремниевой интегральной схемой (верхний диффузионный слой кремниевого фотодиода с проводимостью *n*-типа) применен специальный оптически прозрачный электропроводный слой, экранирующий вход усилителя от высокочастотного фона. Для дополнительного уменьшения высокочастотных наводок используется узкая алюминиевая заземленная полоска, установленная над структурой в области чувствительного центра излучательного диода и присоединенная к слою кремниевого фотодиода в области с проводимостью *n*-типа. Полученная в результате этих мер эквивалентная емкость не превышает 0,1 *пф*.

На рис. 40 приведена схема усилителя, обладающего хорошей стабильностью в диапазоне температур от —70 до +125° С и нечувствительного к небольшим изменениям напряжения питания (усилитель рассчитан на напряжение питания 6 *в*, но может работать и при напряжении от 1,5 до 15 *в*). К его недостаткам следует отнести низкую стабильность на высоких частотах, обусловленную сравнительно большой длиной резистора обратной связи *R*, и большое время восстановления после подачи на излучательный диод импульса тока больше номинального.

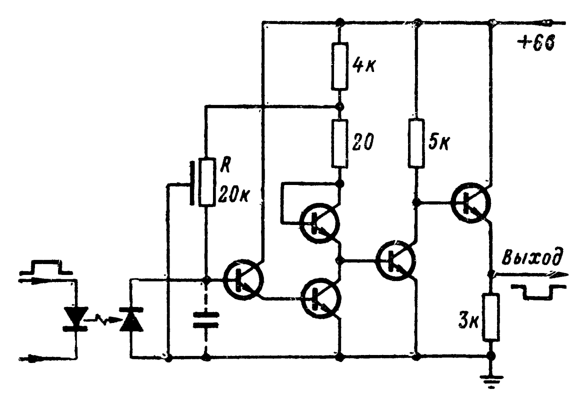


Рис. 40. Схема оптико-электронного импульсного усилителя (*R* — сопротивление обратной связи.)

В усовершенствованном варианте такого усилителя эти недостатки были устранены. Он работал в следующем типовом режиме: напряжение питания 6 *в*, ток через излучательный диод 5 *ма* при напряжении 1,2 *в*, ток через фотодетектор (кремниевый фотодиод) 8 *мка*, перепад напряжений на выходе от 0,3 до 5,3 *в*, время нарастания и спада импульса 500 *мксек*. Усилитель обеспечивал работу десяти стандартных нагрузочных каскадов интегральных схем, выпускаемых той же фирмой. Он может также обеспечить передачу сигналов постоянного уровня и применяться в качестве буферного каскада между отдельными узлами вычислительных устройств в тех случаях, когда токи, вызванные общим заземлением, обусловливают избыточные шумы. Например, его можно использовать для развязки по питанию в субсистемах вычислительных машин, а также между вычислительными машинами и периферийными устройствами, в частности между центральной системой обработки и линией передачи информации.

10. СХЕМЫ С ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯМИ, УПРАВЛЯЕМЫМИ СВЕТОМ

Переключатели, управляемые светом (ПУС), представляют собой вариант кремниевых управляемых вентилей, которые могут управляться световым сигналом. Они позволяют повысить эффективность использования кремниевых управляемых вентилей и упростить фотоэлектрические управляющие устройства путем непосред-

ственного (без промежуточных каскадов усиления) управления нагрузкой.

Обеспечивая полную развязку управляющей и силовой цепей, переключатели, управляемые светом, позволяют создать управляющие схемы совершенно нового типа. Так, например, выпускаемые в США переключатели могут управляться как светом (для этого в корпусе прибора имеется специальное стеклянное окно), так и обычным способом, т. е. электрическими сигналами, подаваемыми на управляющий электрод. Максимальные токи нагрузки для различных типов таких приборов могут быть от 0,1 до 1,6 *а* (при токе 1,6 *а* применяют теплоотвод, температура корпуса прибора не должна превышать 75° С), номинальные напряжения от 25 *в* до 2 *кв*, время переключения и спада 2 *мксек*.

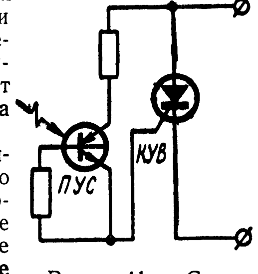


Рис. 41. Схема включения переключателя, управляемого светом (*ПУС*), в качестве предварительного переключающего каскада для запуска мощного кремниевого управляемого вентиля (*КУВ*).

Особенность работы переключателя, управляемого светом, в схемах постоянного тока заключается в том, что он после включения проводит ток до тех пор, пока не отключено напряжение питания. После этого прибор снова переводится в исходное (запертое) состояние. В ряде случаев это приводит к некоторому усложнению устройства, что, однако, не мешает успешно применять такие приборы в различных схемах вычислительных машин и автоматики.

Схемы релейного типа. Использование переключателей, управляемых светом, в качестве предварительных переключающих каскадов для запуска мощных кремниевых управляемых вентилей дает возможность создать схему включения мощных выпрямителей, запускаемую световыми сигналами (рис. 41).

На рис. 42 приведены три схемы релейного типа, использующие переключатели, управляемые светом. Схема на рис. 42,*а* эквивалентна (в отсутствие светового управляющего сигнала) однополюсному релейному самоблокирующемуся контакту на одно направление, рассчитанному на максимальное напряжение 200 *в* и ток 440 *ма*. При подаче управляющего светового сигнала происходит включение прибора. Выключение такого реле осуществляется при помощи внешнего механизма, исключающего слишком большие напряжения на приборе во время переходного процесса.

В релейном устройстве, работающем на переменном токе (рис. 42,*б*), совместно с переключателем, управляемым светом, используется вспомогательная удерживающая схема. Эквивалентной схемой в этом случае является однополюсный контакт на одно направление, включенный последовательно с кремниевым выпрямителем. Поскольку переключатель питается переменным током, в этой схеме отсутствует самоблокировка (каждый полупериод напряжение, проходя через нуль и меняя свой знак, автоматически выключает переключатель). Диод *Д*, включенный параллельно индуктивной нагрузке *Р*, поддерживает ток через нагрузку в течение отрицательного полупериода, когда переключатель заперт. Это

позволяет сгладить пульсации и тем самым повысить стабильность реле.

На рис. 42,*в* приведена схема с двухполупериодным мостовым выпрямителем. Нагрузка *Р* может включаться как в цепь постоянного, так и переменного тока. При индуктивной нагрузке могут возникнуть трудности, связанные с коммутацией переключателя. Дело в том, что ток через переключатель и напряжение питания принимают нулевые значения в разные моменты времени. Поэтому когда

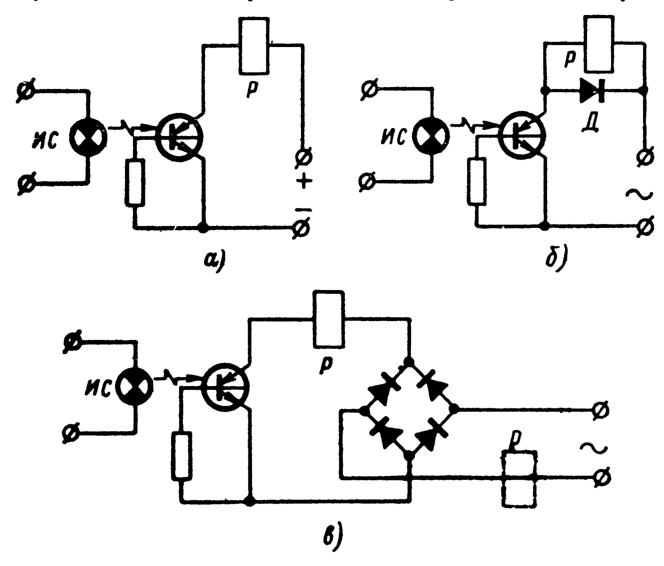


Рис. 42. Схемы релейного типа с переключателем, управляемым светом.

а — реле постоянного тока с самоблокировкой; *б* — реле переменного тока; *в* — реле с мостовым выпрямителем.

ток нагрузки проходит через нуль, переключатель стремится выключиться, но к нему приложено некоторое напряжение, препятствующее этому, причем перепад напряжения может быть достаточным для того, чтобы снова включить переключатель. Если нагрузка включена в цепь постоянного тока, то этот эффект можно устранить включением диода параллельно нагрузке. При включении же нагрузки в цепь переменного тока самоблокировка переключателя исключается подсоединением резистора между одним из плеч мостовой схемы и одной из шин питания переменного тока.

Логические схемы. Наличие двух состояний переключателя, управляемого светом, делает его идеальным прибором для оптико-электронных логических схем. На рис. 43 приведены логические схемы общего назначения. Фотонная связь в подобных логических схемах позволяет полностью электрически развязать отдельные функциональные элементы, а также исключить возможные нежелательные обратные связи между ними. Использование переключателей, управляемых светом, рассчитанных на большие номинальные

токи, дает возможность объединить в одной и той же схеме управляющие и исполнительные функции без дополнительных каскадов усиления.

Схема триггера на переключателях, управляемых световыми импульсами, имеет важное значение для устройств управления на постоянном токе. В такой схеме при включении запертого переключателя $ПУС_1$ путем подачи на него светового импульса обеспечивается одновременное запирание второго (проводящего) переклю-

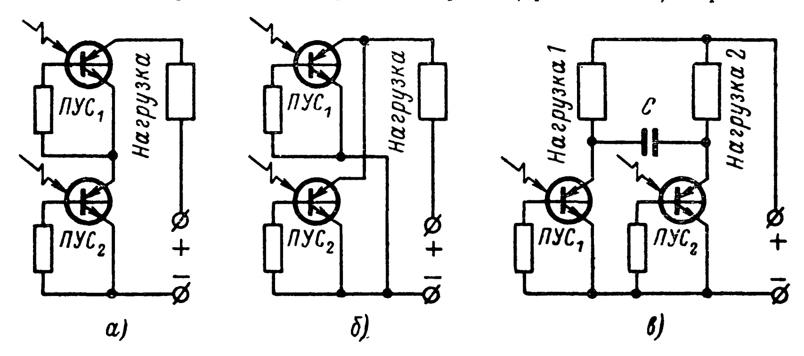


Рис. 43. Логические схемы на переключателях, управляемых светом.

а — схема И; *б* — схема ИЛИ; *в* — триггерная схема.

чателя $ПУС_2$. Проводящий переключатель запирается благодаря конденсатору связи *С*. В схеме триггера (при соответствующем выборе емкости конденсатора) токи через нагрузки *1* и *2* могут значительно различаться, например один из них может быть равен 1 *а* а другой 1 *ма*.

Автоматическое контрольное устройство для поточной линии. Переключатели, управляемые светом, находят применение также в устройствах автоматического управления и контроля. На рис. 44

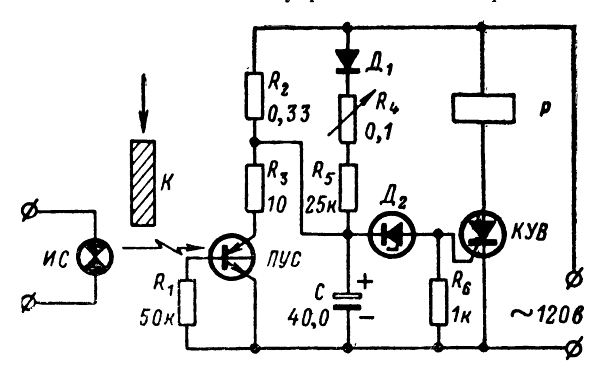


Рис. 44. Схема оптико-электронного устройства для контроля подачи деталей на конвейере.

приведена схема автоматического устройства, которое следит за равномерностью перемещения небольших предметов (деталей) по ленте высокоскоростного конвейера. Схема может «просмотреть» небольшие скопления деталей, однако в случае возникновения их затора она вырабатывает сигнал остановки конвейера.

Рассмотрим работу этого устройства. Кремниевый вентиль *КУВ*, управляемый переключателем *ПУС* и включенный последовательно с обмоткой реле *Р*, нормально находится в запертом состоянии. При прохождении детали по конвейеру *К* между источником света *ИС* и переключателем *ПУС* происходит прерывание пучка света, а так как переключатель питается от сети переменного тока, то он при поступлении отрицательной полуволны напряжения питания отключается и находится в запертом состоянии все время, пока перекрыт пучок света проходящей деталью. В течение этого времени конденсатор *С* заряжается через резисторы R_4R_5 и диод $Д_1$. Напряжение на конденсаторе стремится к амплитудному значению напряжения питания. Однако, как только деталь прекращает прерывать пучок света, переключатель отпирается и конденсатор, практически замкнутый накоротко, разряжается. Если пучок света будет прерван на какое-то время, то конденсатор *С* зарядится до значения, при котором произойдет лавинный пробой диода $Д_2$ и включение кремниевого вентиля, а при этом сработает реле и конвейер остановится. В зависимости от линейных размеров деталей и их допустимых скоплений задержку отключения конвейера можно регулировать резистором R_4 в пределах от нескольких миллисекунд до нескольких секунд.

11. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ В ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКАХ И УСТРОЙСТВАХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Функциональные преобразователи. Оптико-электронная связь позволяет разрабатывать функциональные логические преобразователи, в которых смена выполняемой функции может осуществляться посредством установки масок (шаблонов), прерывающих свет между излучателем и фотоприемником. Излучатели и фотоприемники группируются в платы (решетки), между которыми устанавливаются сменные фотошаблоны, обеспечивающие прохождение света от каждого излучательного диода к соответствующему фотоприемнику. Если на пути пучка света оказывается отверстие, то пучок света от излучателя свободно проходит к соответствующему фотоприемнику, осуществляя необходимую функциональную связь между ними. В случае прерывания пучка света маской такая связь отсутствует. Маска может быть выполнена в виде перфокарты или фотографической микропленки. Функциональный «рисунок» маски и совокупность входных сигналов создают определенный сигнал на выходе устройства.

На рис. 45 показаны две решетки оптико-электронных приборов с фотонной связью и установленной между ними перфорированной маской. При помощи таких решеток со сменными масками (шаблонами) можно создавать компактные и надежные схемы, выполняющие сложные логические функции при минимальном числе деталей. Входы и выходы у таких преобразователей могут быть либо оптическими, либо электрическими.

Такие универсальные логические преобразователи обеспечивают высокую степень стандартизации и автоматизации при изготовлении, так как они могут быть составлены из однотипных плат, выполненных в форме твердых интегральных схем.

Логические универсальные преобразователи могут использоваться для программирования, в сложных системах управления производством и автоматизированными процессами.

Универсальные логические преобразователи можно применять также в качестве настраивающихся систем. Возможность такого их использования заключается в замене механических масок фотохромными масками, способными изменять свой функциональный «рисунок» под действием света, падающего на их поверхность. Задавая определенный «рисунок» при освещении фотохромной маски, можно в соответствии с ним изменять функцию, выполняемую преобразователем, причем фотохромные материалы, входящие в состав маски, обладают свойством менять свою прозрачность постепенно в зависимости от интенсивности и частоты управляющих засветок. Таким образом, степень оптической связи становится зависимой от суммы всех экспозиций световых управляющих сигналов, и преобразователь, следовательно, будет обладать способностью настраиваться. Универсальный настраивающийся преобразователь, использующий подобные схемы, намного превосходит логические и мощностные способности других современных настраивающихся систем.

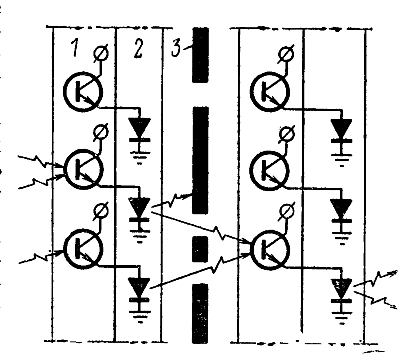


Рис. 45. Решетки оптико-электронных элементов с фотонной связью.
1 — кремниевая решетка с фототранзисторами; *2* — решетка с излучательными диодами; *3* — перфорированная маска.

Запоминающие устройства. К достоинствам оптико-электронных запоминающих устройств следует отнести, во-первых, электрическую развязку их от сопряженных устройств, во-вторых, низкий уровень рассеяния излучения, что позволяет применять длинные передающие линии, и, в-третьих, отсутствие взаимных помех и высокое разрешение, возможное благодаря применению в них фоточувствительных масок при очень короткой длине световой волны.

На рис. 46 показан один из принципов построения оптико-электронного запоминающего устройства. Здесь маска в виде перфокарты или обычной фоточувствительной пластинки служит носителем постоянной информации. Считывание происходит при пропускании через всю площадь или определенную часть маски параллельного светового пучка. Преобразование двоичного кода в электрические сигналы осуществляется при помощи матрицы фотоприемников.

Идея прерывания пучка света при помощи матричной маски (шаблона), где информация расположена по строкам и столбцам, используется в постоянных запоминающих устройствах цифровых вычислительных машин. На рис. 47 схематически представлена система выборки постоянного запоминающего устройства. Для вы-

борки числа при считывании информации применяют волоконные световоды. На одном конце такого световода все волокна собраны в жгут круглого сечения, а на другом волокна равномерно распределены в узкую полосу. Если свет входит в круглую часть световода, то он равномерно распределяется по линейно расположенным волокнам с другой его стороны. Плоскость светоподводящих (числовых) жгутов перпендикулярна плоскости светосъемных (разрядных) жгутов, расположенных с противоположной стороны матричной маски.

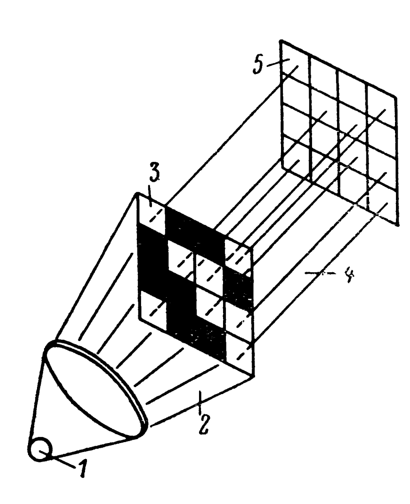


Рис. 46. Схема построения оптико-электронного запоминающего устройства.

1 — источник света; *2* — немодулированный однородный световой пучок; *3* — маска с данными; *4* — оптические информационные сигналы; *5* — фотоприемники.

Двоичная информация размещается в местах пересечения числовых и разрядных светопроводящих жгутов. Считанная информация в виде световых импульсов проходит через разрядные световоды и с выходов их, имеющих круглое сечение, поступает на вход разрядных фотоприемников. Подачей светового импульса через один из числовых световодов осуществляется считывание всего числа, расположенного в строке матрицы. Смена информации, хранящейся в постоянном запоминающем устройстве, производится путем замены маски матрицы.

В настоящее время считается практически возможным построить оптико-электронное постоянное запоминающее устройство с объемом 10^8 двоичных разрядов при плотности записи информации 75 000 двоичных знаков на 1 *см*² при диаметре волокон около 12 *мк*. Размер матрицы в этом случае будет 40×40 *см*². При этом потребуется на площади 1 600 *см*² расположить 10 000 источников света и столько же фотоприемников.

Типовое быстродействие постоянных запоминающих устройств с катодолюминесцентным излучателем может быть оценено следующими данными: время считывания 20 и период обращения 100 *нсек*. Такое соотношение между временем считывания и периодом обращения объясняется большим временем высвечивания электролюминофора. На выходе постоянного запоминающего устройства используются малогабаритные фотоэлектронные умножители с выходным током 10 *ма*. При этом чувствительность фотоэлектронного умножителя и яркость катодолюминофора составляют 0,32 *лм/мм*² и 2 000 *а/лм* соответственно. Применение фотохромных соединений в качестве носителя информации в такого рода запоминающих устройствах позволяет повысить плотность информации и дает возможность при необходимости заменять часть или всю информацию на фотохромном носителе.

На указанном принципе построено за рубежом и находится в эксплуатации устройство с емкостью 90 000 двоичных знаков. Следует отметить, что информация в таком запоминающем устройстве записана на прозрачные диски, покрытые обычной фотоэмульсией. Реальная разрешающая способность эмульсии составляет около 1 000 линий на миллиметр. Имеются также устройства, использующие фотохромный носитель информации и позволяющие частично или полностью стирать старую информацию и записывать новую. В одном из запоминающих устройств в качестве носителя информации используется пленка с разрешающей способностью порядка

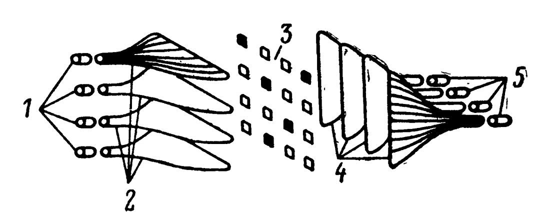


Рис. 47. Система выборки постоянного запоминающего устройства.

1 — источники света для выборки чисел; *2* — стекловолоконные световоды для выборки чисел; *3* — информационная маска (шаблон); *4* — разрядные стекловолоконные световоды; *5* — фотоприемники.

2 000 линий на миллиметр. Запись информации на эту пленку производится экспонированием ультрафиолетового излучения с последующей термообработкой пленки, вызывающей рекристаллизацию облученных ее участков. Изменение коэффициента преломления на границе засвеченных и незасвеченных участков вызывает сильное рассеяние света, что используется при считывании. Пленку, однако, нельзя использовать повторно, так как при термообработке в ней происходят необратимые изменения.

На рис. 48 показана схема построения запоминающего устройства, в котором как для считывания, так и для записи используется очень узкий и достаточно мощный пучок света. Наибольшего успеха в создании такого практически оперативного запоминающего устройства с использованием фотохромного носителя и газового лазера на ионизированном аргоне достигла одна из американских фирм. В запоминающем устройстве этой фирмы запись, считывание и стирание информации производятся световыми пучками трех цветов. Для координатного отклонения пучка света использована система, в которой применены специальные электрооптические кристаллы. Специалисты фирмы уверяют, что запоминающее устройство такого типа позволит достигнуть емкости в 16 000 000 двоичных знаков информации на квадратный сантиметр при частоте обращения к запоминающему устройству 125 *кгц*.

На рис. 49 схематически изображено разработанное в США устройство записи информации лучом газового лазера на диске внешнего накопителя. Рассмотрим работу этого устройства.

Пучок света гелий-неонового лазера *1*, проходя через систему полупрозрачных зеркал *6*, одну из ячеек Керра *5*, диафрагму *9* и

фокусирующий объектив *10*, воздействует на фотоэмульсию, нанесенную на прозрачный диск *11*. Устройство *3* управляет верхней ячейкой Керра *5* так, что при перемещениях диска *11* на него наносятся 3 100 чередующихся черных и белых круговых дорожек, служащих в дальнейшем краями информационных дорожек. Поворот диска и необходимое смещение на соответствующие дорожки осуществляются управляющими устройствами *12* и *16* (фотоумножителем *12*, датчиком угла поворота диска *13*, задающим генератором тактовых импульсов *14*, устройством управления установкой дорожек *15*, устройством поворота диска при записи информации и смещения его на соответствующую дорожку *16*).

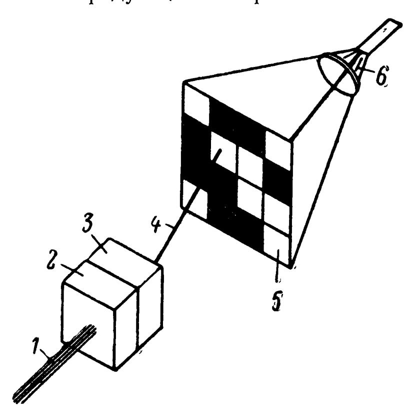


Рис. 48. Схема построения оптико-электронного запоминающего устройства с координатным отклонением пучка света.

1 — пучок света; *2* — кристалл, отклоняющий пучок света в горизонтальном направлении; *3* — кристалл, отклоняющий пучок света в вертикальном направлении; *4* — отклоненный пучок света; *5* — информационная маска; *6* — фотоприемник.

При нанесении вдоль соответствующих дорожек информационных меток пучок света модулируется нижней ячейкой Керра *5*, управляемой устройством *4*. Поиск определенной дорожки непосредственно перед записью производится при помощи источников света (лампы накаливания) с фокусирующей линзой *7*, светофильтра *8*, полупрозрачных зеркал *6*, диафрагмы *9*, а также устройств *12*, *15* и *16*. Общее управление при записи осуществляется логическим устройством *2*.

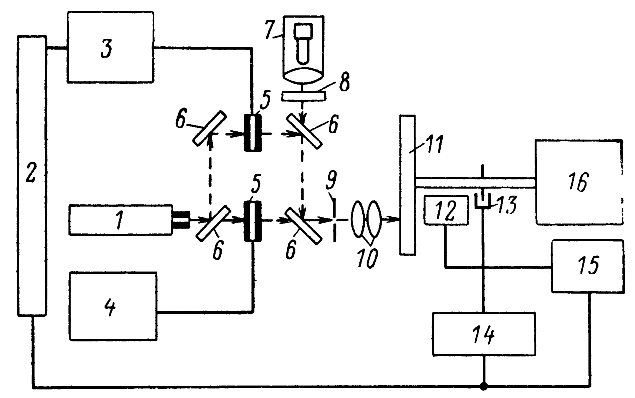


Рис. 49. Схема устройства записи информации лучом лазера на диске с фотоэмульсией.

Двоичные знаки 0 и 1 различаются последовательностью засвеченных и незасвеченных участков (прозрачных и непрозрачных после фиксации эмульсии на диске). Считывание информации (на рис. 49 не показано) осуществляется при помощи электроннолучевой трубки в качестве источника света и фотоумножителя в качестве приемника лучистой энергии. Диск при считывании вращается со скоростью 3 600 *об/мин.*

Схемы с электролюминесцентными источниками света и фоторезисторами. Устройства, состоящие из электролюминесцентного источника света и фоторезистора (их иногда называют оптронами), относятся к инерционным приборам (их частотный диапазон переключения составляет 10—1 000 *гц*). Электролюминесцентный источник света в таких устройствах располагают вблизи высокочувствительного фоторезистора. Он состоит из двух электродов (один из них прозрачный), между которыми помещен слой сульфидного порошка. Питается такой прибор от источника переменного тока. Осуществляя оптическую и электрическую связи между электролюминесцентными приборами и фоторезисторами, получают устройства с двумя устойчивыми состояниями.

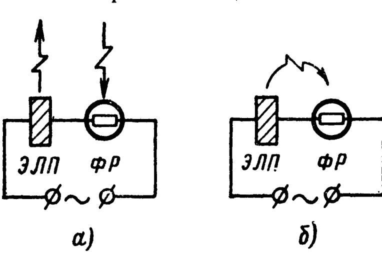


Рис. 50. Схемы оптико-электронных ячеек с электролюминесцентными источниками и фоторезисторами.

а — без обратной связи; *б* — с положительной оптической обратной связью

Две схемы с электролюминесцентным источником света приведены на рис. 50. При освещении фоторезистора *ФР* сопротивление его падает. Это приводит к перераспределению напряжения источника питания между фоторезистором и электролюминесцентным прибором *ЭЛП*, и последний начинает излучать свет. Если свет от этого прибора поступает на последовательно включенный с ним фоторезистор, то все устройство будет проводить ток и после прекращения действия внешнего источника света.

Из таких элементарных устройств (оптронов) могут быть построены триггерные схемы, логические схемы, запоминающие устройства; переключатели, счетчики, сдвигающие регистры, устройства для кодирования углового положения вращающегося вала и т.п. Следует отметить, что подобные устройства могут одновременно служить и в качестве встроенного в это устройство визуального индикатора состояния схемы.

На рис. 51 приведены примеры построения некоторых типовых логических оптико-электронных схем на оптронах. Логические схемы И и ИЛИ (рис. 51,*а* и *б*) содержат по два оптрона с оптической положительной и отрицательной обратной связью. Дополнительная ветвь в этих схемах служит для убыстрения переходов схемы из одного состояния в другое. При использовании сернистокадмиевых фоторезисторов и электролюминесцентных приборов с сернистоцинковым люминофором время переключения схемы составляет 25 — 50 *мсек.* Это время можно уменьшить до нескольких миллисекунд, если сернистокадмиевые фоторезисторы заменить селенистокадмие-

выми. Схема триггера (рис. 51,*в*) выполнена на двух оптронах с положительной оптической обратной связью. По отношению друг к другу оптроны, как и в рассмотренных схемах на рис. 51,*а* и *б*, осуществляют взаимное ускоряющее (гасящее) действие.

Оптроны позволяют строить и более сложные схемы, например схему сдвигающего регистра, кольцевого счетчика и т.п. Однако такие устройства требуют более сложных электрических и оптических

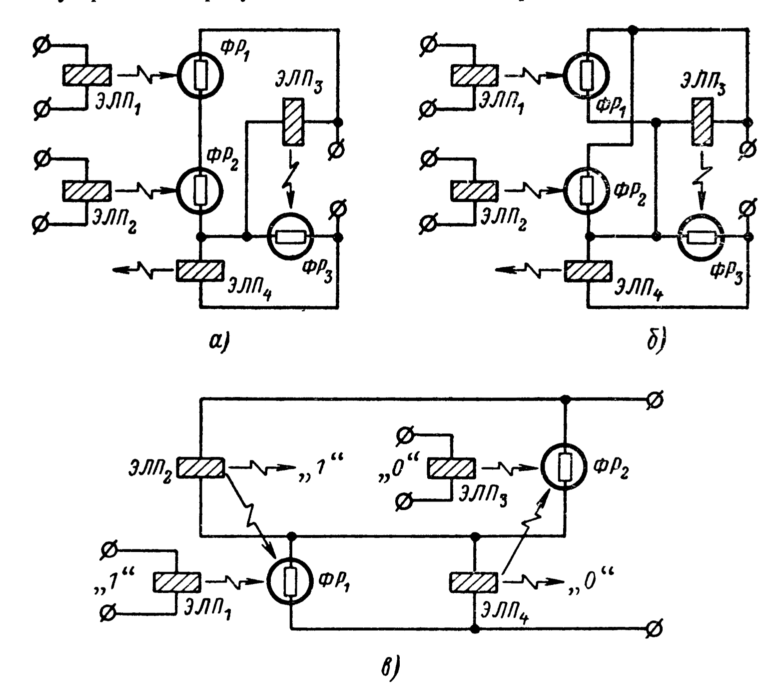


Рис. 51. Логические оптико-электронные схемы на оптронах.
а — схема И; *б* — схема ИЛИ; *в* — схема триггера.

соединений. В случае сдвигающего регистра и кольцевого счетчика, например, на каждый каскад требуется уже шесть ветвей оптической связи.

Электролюминесцентные индикаторные и логические устройства. Возможность наблюдать визуально свечение электролюминесцентных приборов находит эффективное применение в устройствах визуального отображения для индикации, в оптико-электронных преобразователях кодов, а также в индикационных запоминающих плоских панелях матричного типа.

Электролюминесцентные индикаторы, предназначенные для буквенно-цифрового отображения, состоят из набора геометрических сегментно-полосковых светящихся электродов (рис. 52). Подключение к внешнему источнику питания определенного сочетания таких электродов обеспечивает их свечение и визуальное наблюдение. По

своим размерам и конфигурации индикаторные приборы могут быть различными. Минимальные размеры прибора ограничиваются плотностью электролюминесцентных сегментов и надежностью контактов к каждому из таких сегментов для их электрической коммутации. Индикаторы могут иметь различную цветность свечения (голубую, зеленую, желтую, белую).

На рис. 53 показано схематически устройство цифрового преобразователя. Плата *1* преобразователя содержит 10 электролюминесцентных излучателей, выполненных в виде вертикальных полос. Каждый из этих излучателей соответствует одной из десяти деся-

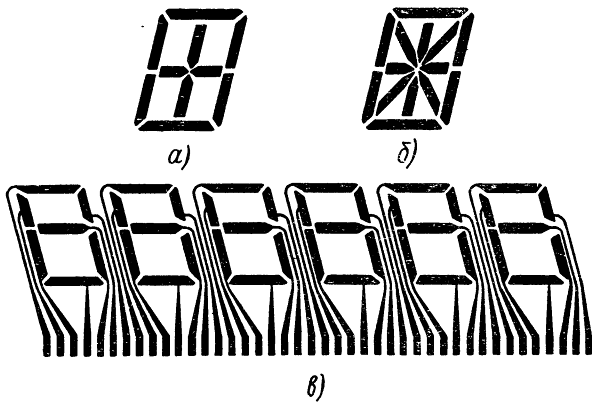


Рис. 52. Электролюминесцентные индикаторные **приборы.**

а — десятисегментный цифровой прибор; *б* — четырнадцатисегментный буквенно-цифровой прибор; *в* — группа семисегментных цифровых приборов.

тичных цифр. Плата *3* состоит из девяти горизонтальных фотоприемных полос, выполненных на фоторезисторах. Между платами *1* и *3* установлена преобразующая маска *2*. Все эти три части преобразователя соединены в один трехслойный пакет.

Рассмотрим процесс преобразования на примере цифры 7. Свет от полосы *7* платы *1* проходит только через три отверстия в маске *2*. Сопротивление соответствующих трех фотоприемных полос платы *3* уменьшается, а это приводит к увеличению проходящего через них тока и, следовательно, к повышению напряжения на соответствующих трех сегментах индикатора *4*, вызывая их свечение.

Время переключения преобразователя составляет 100 — 200 *мсек*. Хотя эта скорость и не соответствует скоростям работы современных быстродействующих вычислительных машин, она вполне достаточна для визуальной индикации, так как максимальная скорость смены визуального восприятия человека оценивается в 500 *мсек*. Такие индикаторы могут найти применение в цифровых вольтметрах. Устройства, управляющие этими индикаторами, работают при малом потреблении мощности и на низкой частоте.

В подобных устройствах можно применять световую самоблокировку для свечения каждого из символов в течение необходимого

времени. Одна из таких схем самоблокировки приведена на рис. 54. Когда кнопка K_1 в этой схеме замкнута, напряжение источника питания подается на электролюминесцентные приборы $ЭЛП_1$ и $ЭЛП_2$, вызывая их свечение. Свет от прибора $ЭЛП_1$ падает на фоторезис-

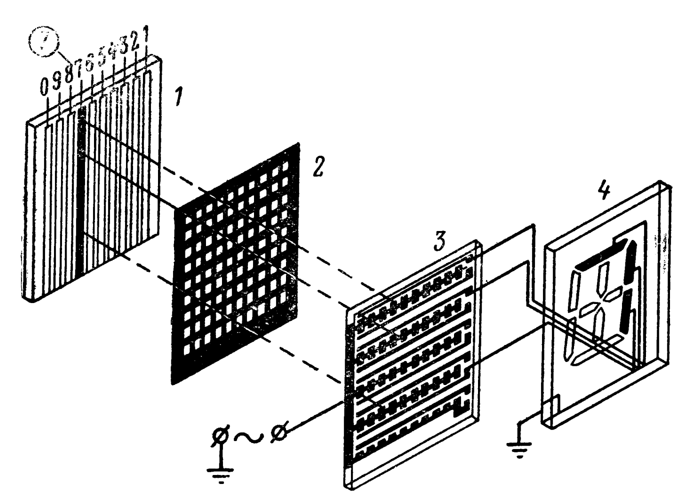


Рис. 53. Схема оптического устройства электролюминесцентного цифрового преобразователя.

тор *ФР*, сопротивление последнего уменьшается, и эти люминесцентные приборы будут излучать свет при разомкнутой кнопке K_1. Первоначальное включение схемы можно произвести и без кнопки K_1 (путем разового освещения фоторезистора от внешнего источника света). Установка схемы в исходное состояние производится размыканием кнопки K_2.

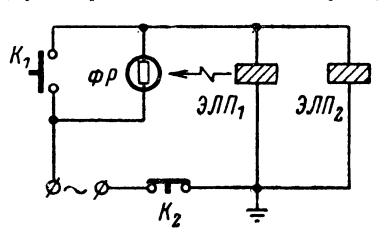


Рис. 54. Схема световой самоблокировки электролюминесцентного индикатора.

На рис. 55 показано схематически устройство двоично-десятичного дешифратора с четырехразрядным двоичным входом (восемь полосовых электролюминесцентных излучателей, соответствующих четырем парам двоичных информационных шин). Каждая пара шин дешифратора соответствует нулю или единице в данном двоичном разряде. Плата фоторезисторов состоит из десяти горизонтальных полос, в каждой из которых по четыре фоторезистора, включенных последовательно и выполняющих логическую функцию И. Если на входе дешифратора установлена, например, двоичная информация 0011, соответствующая десятичной цифре *3*, то будут включены первая, третья, шестая и восьмая электролюми-

несцентные полосы. Свет от них, пройдя через маску, попадает на третью полосу с четырьмя фоторезисторами, и проходящий через эту полосу ток вызовет свечение цифры 3 на выходе дешифратора.

Схематическое устройство преобразователя десятичного кода в двоичный показано на рис. 56. Его отличие от двоично-десятичного дешифратора заключается лишь в конструкции платы с фоторезисторами. Если в двоично-десятичном преобразователе фоторезисторы включены по схеме И, то в десятично-двоичном они включены по схеме ИЛИ.

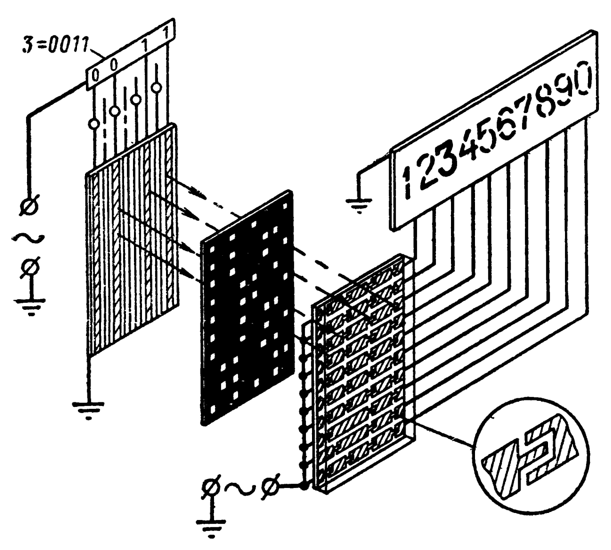


Рис. 55. Двоично-десятичный электролюминесцентный четырехразрядный преобразователь.

В заключение рассмотрим работу люминесцентного матричного запоминающего панельного устройства (рис. 57), собранного на стеклянной подложке *7*. Изолирующая маска *5* предотвращает паразитное оптическое включение бистабильных электролюминесцентно-фотопроводящих элементов. Напряжение от источника питания подается к проволочной сетке *1* и прозрачному проводящему слою *6*. Неосвещенный со стороны проволочной сетки фотопроводящий слой *2* препятствует прохождению тока от проволочной сетки к электролюминесцентному слою *4*. При освещении какого-либо участка фотопроводящего слоя ток, протекая через освещенный участок, создает падение напряжения на соответствующем участке электролюминесцентной матрицы *3*, и этот участок матрицы начинает в свою очередь освещать тот же участок фотопроводящего слоя, поддерживая тем самым включенное состояние устройства сколь угодно долго. Таким образом, устройство способно преобразовывать разовую засветку пучком света в постоянно светящуюся траекторию этого пучка, состоящую из совокупности большого количества светящихся точек. Запоминающая панель размерами 10×10 *см*

состоит из 256 дискретных бистабильных электролюминесцентных приборов.

Устройства для считывания информации с перфокарт и перфолент. В ранних вариантах цифровых вычислительных машин для считывания информации с перфокарт и перфолент применялись электромеханические контактные устройства. Позднее на смену им пришли фотоэлектрические устройства, использующие в качестве источников света специальные лампы с вольфрамовой нитью накаливания. При соответствующей оптике засветка всех дорожек пер-

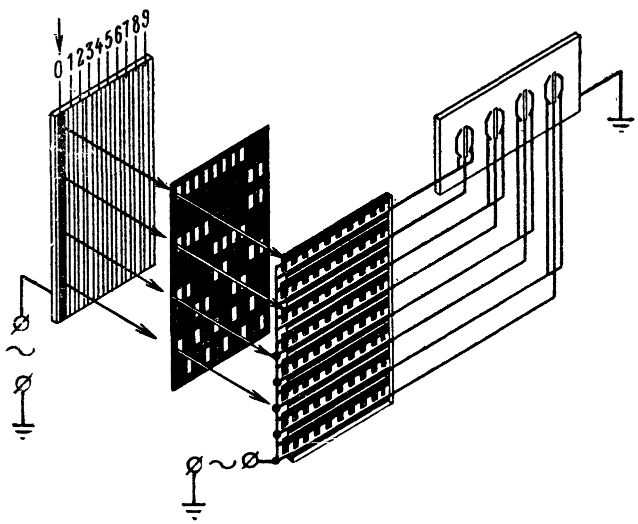


Рис. 56. Десятично-двоичный электролюминесцентный преобразователь.

фоленты осуществляется от одного источника света. В этом варианте источник света устанавливается с одной стороны ленты, а группа кремниевых фотоприемников (по одному на каждую дорожку) — с другой ее стороны. Когда между источником света и фотоприемником оказывается отверстие перфоленты, свет свободно проходит на фотоприемник, и фотосигнал после соответствующей обработки поступает в вычислительную машину,

Вариант с фотоэлектрическими устройствами имеет ряд преимуществ перед электромеханическим способом считывания. Однако устройству с лампой накаливания свойственны следующие недостатки: недостаточная надежность, малый срок службы (30—100 *ч*), большое потребление мощности (порядка 6 *вт*). В этом устройстве нельзя использовать усилитель переменного тока для усиления сигналов с фотоприемников, так как свет от нити накала не может быть промодулирован. Применение же усилителей постоянного тока из-за температурного дрейфа нуля может привести к сбоям при различении единицы от нуля во время считывания. Кроме того, нить лампы может провисать от нагрева, вызывая этим дефокусировку пучка света и снижая тем самым отношение сигнала единицы к сигналу нуля.

Применение арсенид-галлиевых излучателей вместо ламп накаливания позволяет исключить указанные недостатки (снизить расход мощности, уменьшить габариты и резко повысить надежность всего устройства считывания). В устройствах считывания с такими излучателями отношение сигнала единицы к сигналу нуля для обычной перфоленты достигает 500 : 1. В устройстве же с лампой накаливания это отношение не превосходит 20 : 1. Арсенид-галлиевый излу-

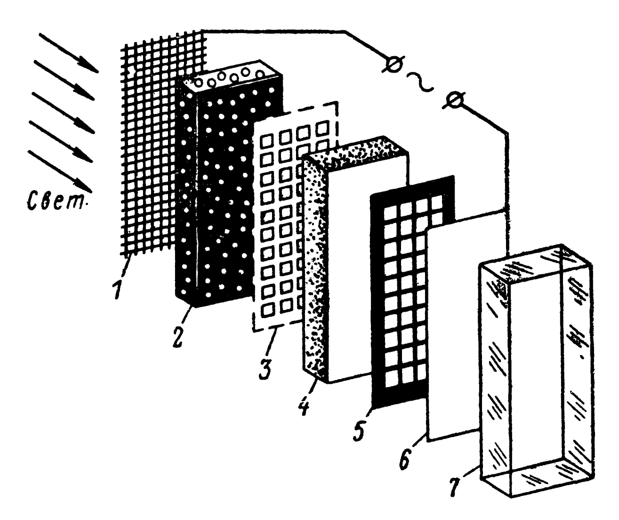


Рис. 57. Электролюминесцентное матричное запоминающее панельное устройство.

чатель питается от генератора импульсов, выполненного на мультивибраторе, запускающем триггер. Последний через эмиттерный повторитель управляет работой мощного выходного транзистора, в коллекторную цепь которого и включен излучательный диод. Излучатель потребляет мощность около 5 *мвт* при импульсе тока 2 *а*. Срок его службы более 1000 *ч*. Устройство может работать в диапазоне частот от 10 *гц* до 1 *кгц*.

Оптико-электронный принцип считывания информации с перфокарт и перфолент с применением арсенид-галлиевых излучателей и кремниевых фотоприемников может быть использован не только в цифровых вычислительных машинах, но и в различных контрольно-измерительных приборах, в устройствах автоматики промышленного назначения и в ряде других устройств и систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптико-электроника, возникшая всего лишь несколько лет назад, получила теперь широкое признание как новое направление в радиоэлектронике. Совместно с квантовой электроникой она открыла новые возможности решения таких проблем, как микроминиатюризация, повышение надежности, снижение шумов и получение предельной экономичности радиоэлектронных устройств. По мнению специалистов, оптико-электроника подобно транзисторной электро-

нике в ближайшие годы совершит переворот в электронной технике и радиопромышленности.

Разработка оптико-электронных устройств требует создания прецизионной технологии и соответствующего оборудования, специальной измерительной аппаратуры, чистых материалов. В настоящее время уже разработаны и успешно используются различные оптико-электронные приборы. Применение их в системах обработки информации сулит огромный выигрыш в быстродействии. Свойства оптико-электронных приборов и перспективы их использования таковы, что, по-видимому, уже в недалеком будущем они получат самое широкое распространение.

В этой книге мы попытались популярно рассказать об основах оптико-электроники и о том, что от нее следует ожидать и где она может найти применение. Мы рассмотрели для этого устройство и принципы работы некоторых оптико-электронных приборов и познакомили наших читателей с результатами их исследования.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Цена 21 коп.

